



BACHELORARBEIT

Herr
Till Kleinert

**Wissenschaftliche Untersuchung
zur Wiederherstellung der akusti-
schen Qualität des Musiksaals des
Deutschen Museums nach um-
fangreicher Sanierung einschließ-
lich des Austausches der
historischen Rabitzdecke**

2018

BACHELORARBEIT

Wissenschaftliche Untersuchung zur Wiederherstellung der akustischen Qualität des Musiksaals des Deutschen Museums nach umfangreicher Sanierung einschließlich des Austausches der historischen Rabitzdecke

Autor:
Herr Till Kleinert

Studiengang:
Media & Acoustical Engineering

Seminargruppe:
MG14w-C

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer:
Dipl.-Ing. Rudolf Liegl

Einreichung:
Mittweida, 29.01.2018

BACHELOR THESIS

Scientifical survey for the reparation of the acoustical quality of the music room of the Deutsches Museum after extensive sanitation including the replace of the historical suspended wire plaster ceiling

author:

Mr. Till Kleinert

course of studies:

Media & Acoustical Engineering

seminar group:

MG14w-C

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

second examiner:

Dipl.-Ing. Rudolf Liegl

submission:

Mittweida, 29.01.2018

Bibliografische Angaben

Kleinert, Till:

Wissenschaftliche Untersuchung zur Wiederherstellung der akustischen Qualität des Musiksaals des Deutschen Museums nach umfangreicher Sanierung einschließlich des Austausches der historischen Rabitzdecke

Scientifical survey for the reparation of the acoustical quality of the music room of the Deutsches Museum after extensive sanitation including the replace of the historical suspended wire plaster ceiling

70 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2018

Abstract

Im Zuge der Sanierungsarbeiten des Deutschen Museums sticht die musikalische Sammlung und deren Ausstellung mit einem Tonnengewölbe durch Ihre raumakustischen Gegebenheiten hervor. Des Weiteren finden im Musiksaal Konzerte mit historischen Instrumenten statt. Der akustische Charakter wird sehr geschätzt und soll nach Sanierung wiederhergestellt werden. Die vorliegende Arbeit betrachtet diese Sanierung durch wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse mit Hilfe von Computersimulation und Messung. Abschließend wird eine Lösung für das obengenannte Problem dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	1
2 Aufgabenstellung.....	2
3 Theoretische Grundlagen	3
3.1 Schallausbreitung in Räumen.....	3
3.1.1 Das Diffuse Schallfeld	3
3.1.2 Reflexion und Beugung.....	6
3.1.3 Äquivalente Schallabsorptionfläche & Absorptionsgrad.....	9
3.1.4 Passive Absorber	12
3.1.5 Reaktive Absorber	15
3.1.6 Schwingungsverhalten zweischaliger Bauteile	17
3.1.7 Raumakustische Kriterien	20
3.1.8 Klangeigenarten der Tasteninstrumente.....	27
3.2 Messung der Nachhallzeit	31
3.2.1 Grundlagen	31
3.2.2 Sweep-Verfahren	32
3.3 Computersimulation	34
3.3.1 Grundlagen	34
3.3.2 EASE	35
4 Ergebnisteil	38
4.1 Beschreibung des Musiksaales	38
4.2 Messung der Nachhallzeit	42
4.3 Bestandsanalyse.....	46
4.3.1 Rabitzdecke im Bestand	46
4.3.2 Parkettboden im Bestand	49
4.3.3 Instrumente.....	50
4.3.4 Abbildung der Bestandssituation in EASE.....	51
4.3.5 Plausibilisierung Rechenmodell - Messung	51
4.4 Neugestaltung der Ausstellung.....	54
4.5 Variantenuntersuchung & Simulationsergebnisse	58

4.6	Ergebnis und Bewertung.....	67
4.7	Fazit	70
Literaturverzeichnis		XI
Anlagen, Teil 1: Fotodokumentation.....		XIV
Anlagen, Teil 2: Messdokumentation.....		XXII
Anlagen, Teil 3: Dokumentation der Simulation.....		XXVII
Eigenständigkeitserklärung		XXX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Reflexionswirkung einer Fläche mit Strukturen der Breite b in Abhängigkeit der Wellenlänge λ [Fasold 2003].....	7
Abbildung 2: Reflexion an gewölbten Flächen nach [Meyer 2015].....	8
Abbildung 3: Einfluss der Absorberschichtdicke d auf den Schallabsorptionsgrad bei Anordnung eines homogenen porösen Absorbers unmittelbar von schallharter Wand [Schirmer 2006].....	14
Abbildung 4: Kombierter Schallabsorber für breitbandige Wirkung [Fasold 2003].....	17
Abbildung 5: Optimale mittlere Nachhallzeiten T_m bei 500 bis 1000 Hz für verschiedene Raumfunktionen in Abhängigkeit vom Raumvolumen V [Fasold 2003].....	22
Abbildung 6: Richtcharakteristik eines Flügels in der Vertikalebene bei geöffneten und geschlossenen Deckel in den hohen Lagen [Meyer 2015].....	28
Abbildung 7: Verarbeitung der Messdaten mittels Sweep-Anregung [DIN EN ISO 18233].....	33
Abbildung 8: Grundriss des Musiksaales im Bestand mit den Nebenräumen 1 & 2	40
Abbildung 9: Schnitt mit Sicht auf die Südwestseite des Musiksaals	41
Abbildung 10: Vergleich zwischen Messung mit und ohne Exponate	44
Abbildung 11: EASE Modell des Musiksaals	51
Abbildung 12: Grundriss mit geplanter Aufstellung der Instrumente inklusive Flächenangaben zu den Sockeln	56
Abbildung 13: Auszug aus der Entwurfsplanung für Komponenten und Möblierung.	57
Abbildung 14: Nachhallzeitdiagramm mit Simulationsergebnis im Vergleich zum Bestand.....	58
Abbildung 15: Simulationsergebnis der Variante 1	61
Abbildung 16: Simulationsergebnis der Variante 2	62
Abbildung 17: Simulationsergebnis der Variante 3	63
Abbildung 18: Simulationsergebnis der Variante 4	64
Abbildung 19: Simulationsergebnis der Variante 5	65
Abbildung 20: Exponate im Bestand im Musiksaal des Deutschen Museums.....	XIV
Abbildung 21: Musiksaal des Deutschen Museums vor der Sanierung.....	XV
Abbildung 22: Musiksaal ohne Exponate.....	XV
Abbildung 23: Markierung der Probenentnahmestellen aus der Rabitzdecke im Musiksaal	XVI
Abbildung 24: Rabitzdecke während des Abrisses mit Sicht auf die Abhängung	XVI
Abbildung 25: Entnahme der Proben für die Analyse	XVII
Abbildung 26: Probe 1 aus der Decke	XVII
Abbildung 27: Rückansicht Probe 1 mit erkennbarem Rabitzgitter	XVIII
Abbildung 28: Probe 2.....	XVIII
Abbildung 29: Probe 3.....	XIX
Abbildung 30: Probe 4.....	XIX
Abbildung 31: Probe 5.....	XX
Abbildung 32: Musiksaal ohne Rabitzdecke mit dahinter liegender Deckenkonstruktion aus Beton.....	XX
Abbildung 33: Bauteilöffnung des Parkettbodens im Bestand.....	XXI
Abbildung 34: Mess- und Sendepositionen der Nachhallzeitmessung vom 29.10.2015 anhand der Messdokumentation durch die Möhler & Partner AG	XXII

Abbildung 35: Numerische Tabelle der Nachhallzeitmessung vom 29.10.15	XXII
Abbildung 36: Graph der Abklingkurve der Nachhallzeitmessung vom 29.10.15	XXIII
Abbildung 37: Spektrumgraph der vier Messpositionen der Messung vom 29.10.15	XXIII
Abbildung 38: Mess- und Sendepositionen der Nachhallzeitmessung vom 08.09.2016 anhand der Messdokumentation durch die Möhler & Partner AG	XXIV
Abbildung 39: Numerische Tabelle der Nachhallzeitmessung vom 08.09.16	XXIV
Abbildung 40: Graph der Abklingkurve der Nachhallzeitmessung vom 08.09.16	XXVI
Abbildung 41: Spektrumgraph der vier Messpositionen der Messung vom 08.09.16	XXVI
Abbildung 42: Simulationsmodell mit Instrumenten	XXVII
Abbildung 43: Perspektive in den simulierten Raum.....	XXVII
Abbildung 44: Modell der Neugestaltung der Ausstellung.....	XXVIII
Abbildung 45: C80 Bewertung bei M1 aus der ersten Simulation	XXVIII
Abbildung 46: C50 Bewertung bei M1 aus der ersten Simulation	XXIX

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

A/D	Analog/Digital
AURA	Analysis Utility for Room Acoustics
BR	Bassverhältnis
CAD	Computer-aided design
D/A	Digital/Analog
EASE	Enhanced Acoustic Simulator for Engineers
LTl	Linear time invariant (-system)
RASTI	Rapid Speech Transmission Index
RT	Real Time
STI	Speech Transmission Index

Formelzeichen

Δp	Druckänderung in Pa
Δx	Wegstrecke in mm
A	Äquivalente Absorptionsfläche in m ²
A_j	Äquivalente Absorptionsfläche eines Objektes in m ²
A_L	Äquivalente Absorptionsfläche mit Bezug auf Luftabsorption in m ²
Al_{cons}	Artikulationsverlust von Konsonanten in %
A_{res}	Resultierende äquivalente Absorptionsfläche in m ²
B'	Biegesteifigkeit
c_0	Schallgeschwindigkeit = 340 m/s
C_{50}	Deutlichkeitsmaß in dB
C_{80}	Klarheitsmaß in dB
d_L	Abstand zur Wand in cm
E	Elastizitätsmodul in N/m ²
E_{Bl}	Schallenergiekomponente
f	Frequenz in Hz
f_0	Resonanzfrequenz in Hz
f_g	Koinzidenzgrenzfrequenz in Hz
f_{max}	Nyquist-Frequenz in Hz
f_n	Eigenfrequenz in Hz
f_s	Grenzfrequenz (Schröderfrequenz) in Hz
f_s	Abtastrate in Hz
f_u	Untere Grenzfrequenz in Hz
G	Stärkemaß in dB
H	Hallmaß in dB
l	Länge in m
LF	Seitenschallgrad in dB
L_p	Schalldruckpegel in dB
L_w	Schallleistungspegel einer Schallquelle in dB

m	Energiedämpfungskonstante in m^{-1}
M	Masse in kg
m''	Flächenbezogene Masse in kg/m^2
\underline{p}_d	Durchgelassener Schalldruck in Pa
\underline{p}_e	Eintreffender Schalldruck in Pa
\underline{p}_r	Reflektierter Schalldruck in Pa
\underline{R}	Schallreflexionsfaktor
R	Raumeindrucksmaß in dB
r_H	Hallradius in m
S	Fläche in m^2
s'	Dynamische Steifigkeit in MN/m^3
T	Nachhallzeit in s
T_{Eyr}	Nachhallzeit nach Eyring in s
T_m	Mittlere Nachhallzeit in s
T_o	Bezugsnachhallzeit = 1s
t_s	Schwerpunktzeit in s
V	Volumen in m^3
v	Geschwindigkeit in m/s
V_A	Gesamtvolumen des porösen Absorbers in m^3
V_B	An der Beschleunigung beteiligtes Volumen in m^3
V_K	An der Kompression beteiligtes Volumen in m^3
V_L	Akustisch wirksames Luftvolumen in Poren in m^3
V_o	Bezugsvolumen = 1m^3
W_1	Schalleistung in W
W_2	Transmittierte Schalleistung über direktem Weg in W
W_3	Transmittierte Schalleistung über Flankenweg in W
W_{abs}	Absorbierte Schalleistung in W
W_{diss}	Dissipierte Schalleistung in W
W_{refl}	Reflektierte Schalleistung in W
α	Schallabsorptionsgrad
ε	Lochflächenverhältniss
ϑ	Schalleinfallswinkel, bezogen auf die Flächennormale der Wand
λ	Wellenlänge in m
μ	Poissonsche Querkontraktionszahl
Ξ	Längenbezogener Strömungswiderstand in $\text{N s}/\text{m}^4$
ρ	Schallreflexionsgrad
ϱ	Dichte in kg/m^3
σ	Porosität
ω	Winkelfrequenz (Kreisfrequenz), $\omega = 2\pi f$
τ'	Transmissionsgrad mit Flankenübertragung

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geometrische Angaben	40
Tabelle 2: Nachhallzeit T20 bei den Oktavmittenfrequenzen 125 Hz bis 4000 Hz, Musiksaal mit Instrumenten, Deutsches Museum in München vom 26.10.15	43
Tabelle 3 Nachhallzeit T20 bei den Oktavmittenfrequenzen 125 Hz bis 4000 Hz, Musiksaal ohne Instrumente, Deutsches Museum in München vom 08.09.16	43
Tabelle 4: Dichte durch Messung der Proben aus der Rabitzdecke.....	47
Tabelle 5: Mittelwertbildung der Dichten in [kg/m ³]	47
Tabelle 6: Berechnung der Flächenbezogenen Masse in [kg/m ²]	48
Tabelle 7: Zusammenfassung der für die Akustik maßgebenden Parameter und die berechneten Resonanzfrequenzen in [Hz].....	49
Tabelle 8: Materialkennwerte des Fußbodenaufbaus	50
Tabelle 9: Berechnung der Resonanzfrequenz des Parkettbodens	50
Tabelle 10: Angaben zu Schallabsorptionsgraden α in den Oktavmittenfrequenzen von 125 Hz bis 4000 Hz, gemäß Berechnungsergebnis aus der Untersuchung und Angaben zu Planungswerten gemäß normativen Vorgaben aus [DIN 18041].....	52
Tabelle 11: Geplanter Bodenaufbau gemäß Abstimmung mit den planenden Architekten	55
Tabelle 12: Angaben zu Schallabsorptionsgraden für die Sanierung	57
Tabelle 13: C ₅₀ und C ₈₀ Maße aus der Simulation.....	59
Tabelle 14: Absorptionsschallwerte der akustischen Maßnahmen für die Variantenuntersuchung	60
Tabelle 15: Vergleich C50 und C80.....	66
Tabelle 16 Zusammenfassung und Bewertung des Ergebnisses hinsichtlich Einhaltung der Zielkurve für die Nachhallzeit.	68

1 Einleitung

Die Sammlungen des Deutschen Museums in München positionieren sich als herausragender Ort für die Vermittlung von naturwissenschaftlich-technischer Bildung. Als kulturelle Institution mit Bildungsauftrag sieht sich das Deutsche Museum auch in Zukunft als Garant für die Erhaltung und Vermittlung von wissenschaftlichen und technischen Errungenschaften der Menschheit. Mit der Neugestaltung und der Digitalisierung der Ausstellungen soll hierfür der Weg für die Modernisierung und die Zukunft geebnet werden. Ausgehend von diesen Tatsachen ist eine bauliche Sanierung des historischen Ausstellungsgebäudes auf der Museumsinsel in München inklusive einer Erneuerung der Sammlungen in inhaltlicher, didaktischer und ästhetischer Weise notwendig.

Die Kernsanierung des Gebäudes steht hierbei im Mittelpunkt der Modernisierung und benötigt für die ausführenden Gewerke eine umfassende Analyse und Planung. Neben den klassischen bauphysikalischen Gebieten, wie Wärme-, Schall- und Brandschutz, werden die raumakustischen Eigenschaften der Ausstellungsräume ebenfalls in Hinblick auf Sprachverständlichkeit und Hörsamkeit neu betrachtet. Bei einem Bau dieser Größenordnung mit unterschiedlich gestalteten Räumen sind die Anforderungen für eine angepasste Hörsamkeit im Hinblick auf Sprachalarmierungsanlagen von großer Bedeutung und benötigen einer entsprechend angepassten Akustik der verschiedenen Ausstellungsräume.

Innerhalb dieser Sammlungen sticht der Musiksaal mit seinen historischen Instrumenten als ein außerordentliches Zusammenspiel des musikalischen Empfindens mit der Akustik des Raumes heraus. Gemäß dem Nutzerbedarfsprogramm der Kuratoren des Deutschen Museums zu den Ausstellungen soll der Musiksaal als musikalisches Ensemble erhalten bleiben und behutsam modernisiert werden. Der Leitgedanke des akustischen und musikalischen Erlebnisses im visuellen Hintergrund der Exponate soll auch zukünftig den Musiksaal als Ausstellungsfläche kennzeichnen und diesen für weitere Veranstaltungsnutzungen bereitstellen.

Diese Abschlussarbeit entsteht in der Zusammenarbeit mit der Firma Möhler & Partner Ingenieure AG, die für die beratende Funktion und die raumakustische Planung von seitens des Deutschen Museums beauftragt wurde.

2 Aufgabenstellung

Im Zuge der Sanierung des Sammlungsbaus des Deutschen Museums erfolgt auch eine Sanierung des Musiksaals. Es erfolgen unter anderem der Rückbau und die Erneuerung der Rabitzdecke und des hohlliegenden Parkettbodens im Bestand des Musiksaals. Da die Akustik im Musiksaal als hervorragend gilt und auch nach Umbau des Musiksaals in der bisherigen Qualität erhalten bleiben soll, ist eine genaue Untersuchung der akustischen Gegebenheiten im Bestand und damit die schalltechnischen Angaben zur neuen Planung erforderlich.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein fundiertes Ergebnis für die Wiederherstellung der akustischen Eigenschaften des Musiksaals des deutschen Museums nach Sanierung zu erhalten. Das vorgeschlagene System soll sich dabei an der ermittelten Bestandssituation orientieren.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die für die Untersuchung und Auswertung theoretischen Grundlagen näher erläutert. Hierbei werden neben der Erläuterung der raumakustischen Grundbegriffe und des raumakustischen Planungsprozesses auch die für den Ergebnisteil benötigten Verfahren zur Messung der Nachhallzeit und der Computersimulation beschrieben.

Der zweite Teil dokumentiert das Vorgehen bei der Analyse der akustischen Eigenschaften. Auf Basis von zwei Nachhallzeitmessungen vor der Sanierung mit jeweils unterschiedlichen Situationen wird ein Simulationsmodell des Musiksaales mit der Simulationssoftware EASE zur Abbildung der akustischen Bestandssituation erstellt. Durch die Erkenntnis der schalltechnischen Eigenschaften der Decke und des hohlliegenden Parkettbodens anhand der Abbruchdokumentation durch die Abrissfirma sollen diese Eigenschaften in das Simulationsmodell implementiert werden. Da eine Änderung der Ausstellung der Musikinstrumente und der baulichen Gegebenheiten erfolgt, müssen diese, die Akustik beeinflussenden Elemente ebenfalls bewertet und entsprechende Angaben zur Neuplanung beschrieben werden. Dabei spielt die Abschätzung der Richtcharakteristiken und die akustische Wirkung der Musikinstrumente für das Nutzungsprogramm ebenfalls eine Rolle.

Nach Abschluss der Analyse werden die Ergebnisse ausgewertet und sollen als Gesamtkonzept für die Ausführung zur Verfügung gestellt werden. Hierbei sind die Anforderungen der planenden Architekten und die des Deutschen Museums zu beachten.

3 Theoretische Grundlagen

Die nachfolgenden Kapitel unterteilen sich in die Erläuterung der theoretischen Grundlagen der Schallausbreitung in Räumen, dem messtechnischen Ablauf der verwendeten Nachhallzeitmessung und dem für die raumakustische Untersuchung notwendigen rechentechnischen Simulationsverfahren für Schallausbreitungsvorgänge in Räumen.

3.1 Schallausbreitung in Räumen

Die Theorie der Raumakustik kann nach heutigem Wissensstand in drei Ansätze unterteilt werden. Hierbei wird zwischen der wellentheoretischen, der geometrischen und der statistischen Raumakustik unterschieden. Für diese Arbeit wird im nachfolgenden auf die geometrische Raumakustik und speziell die statistische Raumakustik eingegangen, um bei der beschriebenen Problematik mit Hilfe von statistischen Mitteln zu reüssieren. Ein Verständnis über die äquivalente Schallabsorptionsfläche und der damit einhergehenden Anwendung der statistischen Nachhalltheorie sind überdies notwendig, um das Simulationsprogramm anzuwenden und zu verstehen. Des Weiteren wird die Funktionsweise von technischen Absorbern beschrieben, da diese für eine spätere Einschätzung der Schallabsorptionseigenschaften der Raumbegrenzungsflächen dienlich ist. Hierzu schließt sich das Kapitel über das Schwingungsverhalten zweischaliger Bauteile an, welches für die Analyse der Rabitzdecke und des Parkettbodens ausschlaggebend ist. Mittels der Erläuterung von raumakustischen Kriterien soll zum einen die für diese Arbeit notwendigen Gütemerkmale bereitgestellt werden und zum anderen ein Grundverständnis über die Möglichkeit bei akustischen Raumuntersuchungen geschaffen werden. Die Klangeigenarten von Tasteninstrumenten informieren im Anschluss über deren Klangcharakter und deren Richtwirkung. Dies wird für eine Abschätzung über die Wechselwirkung der Instrumente mit den Raumbegrenzungsflächen benötigt.

3.1.1 Das Diffuse Schallfeld

Im Vergleich zur Schallausbreitung im Freien, bei der sich der Schalldruckpegel mit zunehmender Entfernung von einer Schallquelle reduziert, beschreibt die Schallausbreitung im Inneren von Räumen, dass der Schalldruckpegel von einem bestimmten Mindestabstand zur Quelle näherungsweise ortsunabhängig ist (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.1). Diese Tatsache ist darin begründet, dass sich die von einer Schallquelle ausgehenden Schallwellen durch Einfach- und Mehrfachreflexionen an den Raumbegrenzungsflächen überlagern und sich daraus ein sogenanntes diffuses Schallfeld ent-

wickelt. Diffusität beschreibt somit ein Schallfeld, dass theoretisch in Hinblick auf die Intensität und die Einfallsrichtung ortsunabhängig ist. Der Schallpegel in einem Raum ergibt sich demnach aus dem gleichzeitigen Eintreffen des Direktschalls einer Schallquelle und einer Vielzahl von Schallrückwürfen, die unterschiedliche Laufzeiten aufweisen und in verschiedenen Maßen abgeschwächt werden. Erreicht dieses Zusammenwirken einen stationären Zustand, kann davon ausgegangen werden, dass die Energiebilanz zwischen der von den Absorptionsflächen geschluckten Energie und der von der Schallquelle nachgelieferten Energie ein Gleichgewicht aufweist. Hieraus lässt sich die sog. Energiedichte, die Schallenergie pro Volumeneinheit, berechnen, mit der sich der Schalldruckpegel L_p des statistischen Schallfeldes im Raum ergibt:

$$L_p = L_w - 10 \lg \frac{V}{V_0} + 10 \lg \frac{T}{T_0} + 14 \text{ dB} \quad (3.1.1.1)$$

Der Term von 14 dB resultiert aus einigen Konstanten und Bezugswerten für den Schallleistungspegel L_w und den Schalldruckpegel L_p . Der oben aufgeführte Schalldruckpegel L_p des statistischen Schallfeldes ist nach der beschriebenen Beziehung theoretisch, wie sinngemäß oben bereits beschrieben, überall im Raum gleich groß (vgl. [Meyer 2015], Kap. 5.4.1). Die Größe des Raumes, die Leistung der Schallquelle und die Nachhallzeit (siehe Kap. 3.1.7) beeinflussen maßgeblich den Schalldruckpegel des statistischen Feldes und damit auch die Energiedichte. Da in Gleichung (3.1.1.1) die Nachhallzeit als frequenzabhängige Größe betrachtet wird, ist auch die Energiedichte eine frequenzabhängige Größe, die von der Schallquelle und der spektralen Schallabsorption im Raum abhängt. Stimmt die Wellenlänge des Schalls wenigstens mit einer der Raumabmessungen überein, kann es zu Raumresonanzen bzw. stehenden Wellen, kommen. Diese sog. Raummoden treten bei den Eigenfrequenzen eines Raumes auf (vgl. [Nocke 2014], Kap. 6.4). Bei einfachen Betrachtungen von quaderförmigen Räumen können die hervortretenden Resonanzen nach folgender Beziehung berechnet werden:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (3.1.1.2)$$

n_x , n_y und n_z bezeichnen die Mode in die jeweilige Raumrichtung. Die Parameter l_x , l_y und l_z beschreiben die Abmessungen des quaderförmigen Raumes. (vgl. [Cremer 1976], Kap. 11). Bei anderen Raumformen gestaltet sich die rein analytische Bestimmung der Eigenfrequenzen nach Gleichung (3.1.1.2) als schwierig. Das Schrägstellen einer Wand oder die Wölbung einer Decke bietet somit keine Möglichkeit für das Verhindern von Raummoden. Mit Hilfe der Betrachtung der Statistik der Raumresonanzen

wird ein Kriterium für die Entstehung eines diffusen Schallfeldes geliefert. Die Eigenfrequenzdichte wächst quadratisch mit der Frequenz. Für kleine Räume und tiefe Frequenzen bedeutet dies ein geringes Vorkommen von Eigenfrequenzen pro Terz oder pro Oktave. Folglich bestimmen bei tiefen Frequenzen, d.h. niedriger Raummodendichte lediglich wenige Frequenzen das Schallfeld im Raum (vgl. [Nocke 2014], Kap. 6.4). Bei diesen Frequenzen trifft die Annahme eines diffusen Schallfeldes nicht oder jedenfalls nur mit Einschränkung zu.

Im Zusammenhang mit Diffusität ist der Begriff der Grenzfrequenz zu nennen. Das Vorhandensein von ausreichend vielen Raummoden oberhalb dieser Grenzfrequenz beschreibt ein Schallfeld als diffus. Die sog. Schröderfrequenz erklärt das Zusammenrücken von Resonanzen, sodass das Schallfeld für die genormten raum- und bauakustischen Messungen als gleichförmig anzusehen ist.

$$f_s > (1200 - 4000) \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (3.1.1.3)$$

Vorwiegend für tiefe Frequenzen ist die Beziehung nach Gleichung (3.1.1.3) von Bedeutung, da insbesondere in kleinen Räumen, Hohlraum- und Eigenresonanzen anregen und es bei bestimmten Frequenzen zu einer Verstärkung der Schwingungen kommen kann. (vgl. [Fuchs 2017], Kap. 2).

Anhand dieser Überlegungen sollte ebenfalls beachtet werden, dass es immer einen Nahbereich einer Schallquelle in einem Raum gibt, in dem der Einfluss des Raumes nicht wirksam ist. Die Kugelschallquelle liefert hierfür die Berechnungsgrundlage, um den Abstand in einem Raum zu berechnen an dem der Direktschall überwiegt. Die Entfernung zum Quellenmittelpunkt, bei der das Direktschallfeld und das diffuse Hallfeld eine gleiche Energiedichte besitzen, wird als Grenzradius oder Hallradius bezeichnet (vgl. [Schirmer 2006], Kap.13.3.2). Der Hallradius r_H kann mit der folgenden Beziehung definiert werden:

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (3.1.1.4)$$

Dieser Zusammenhang ist insbesondere für die in Kapitel 3.2 beschriebenen Messverfahren von Bedeutung, da die Aufstellung der Messmikrofone außerhalb des Hallradius geschehen muss, um den Einfluss der Energiedichte des Direktschalls zu vermeiden. Des Weiteren kann es zum Zwecke der Pegelminderung mittels Schallabsorptionsmaßnahmen von Vorteil sein den Hallradius zu kennen. Wenn die Schallquelle wie in

den meisten Fällen eine Richtwirkung hat, vergrößert sich der Hallabstand in der Vorzugsrichtung, während er nach anderen Seiten kleiner wird als bei einem Kugelstrahler (vgl. [Cremer 1978], Kap. 7). Im Falle der gerichteten Schallabstrahlung ist Gleichung (3.1.1.4) um den Faktor $\sqrt{\gamma}$, wobei der Richtfaktor γ der Schallquelle das Verhältnis der Maximalintensität I_{\max} zur mittleren Strahlungsintensität in einem bestimmten Abstand bestimmt (vgl. [Möser 2003], Kap. 11.1.3.2).

Wie bereits erwähnt, ist der zeitliche und örtliche Aufbau eines diffusen Schallfeldes abhängig von den geometrischen Gegebenheiten eines Raumes und dessen Interieur. Die sog. Primärstruktur eines Raumes, die geometrischen Abmessungen, können mit Hilfe von Sekundärstrukturen, wie der Oberflächenbeschaffenheit der Raumbegrenzungsflächen oder gezielten Eingriffen mit Hilfe von schalltechnischen Absorber, beeinflusst werden. Jedoch sollte schon bei der Planung eines Raumes für die vorgesehene Nutzung darauf geachtet werden inwieweit architektonische Gestaltung zweckmäßig erscheint. Hier auf aufbauend wird im nachfolgenden Kapitel auf die Reflexionsvorgänge in Räumen näher eingegangen. Mit der Beschaffenheit der Primärstruktur eines Raumes kann deutlich Einfluss auf die Hörsamkeit genommen werden.

3.1.2 Reflexion und Beugung

Die Ausbreitung von Schall in einem homogenen Medium wie der Luft geschieht in Form von sich geradlinig fortpflanzenden Wellenbewegungen. Mit dieser einfachen physikalischen Überlegungsweise können akustische Betrachtungen mit der Vorstellung eines Schallstrahles, der den Schallsender und den Beobachtungspunkt geradlinig miteinander verbinden, durchgeführt werden (vgl. [Meyer 2015], Kap. 5.1.1). Durch das Auftreffen von Schallwellen auf einen Körper, kommt es in Abhängigkeit der Material- und Oberflächenbeschaffenheit zu einer frequenzabhängigen Wechselwirkung zwischen dem Material und dem Schall. Ausschlaggebend für Reflexionsvorgänge sind das Verhältnis der Schallwellenlänge zu den Längs- und Querabmessungen der reflektierenden Flächen. Wiederum abhängig von der Oberflächenform erfolgen Reflexionen auf drei unterschiedlichen Weisen. Ist die Wellenlänge kleiner als die Strukturgröße kann der einfallende Schallstrahl als spiegelnde Reflexion betrachtet werden. In Analogie zu dem bekannten Gesetz in der Optik bedeutet das, dass Einfallswinkel gleich dem Ausfallwinkel ist und sich der Schallstrahl in einer Ebene befindet (vgl. [Nocke 2014], Kap. 3.3). Sind die Abmessungen der Oberflächenstruktur vergleichbar mit den Wellenlängen kommt es zu diffusen Reflexionen, hierbei handelt es sich nicht mehr um gerichtete Reflexionsvorgänge. Nach [Fasold 2003] wird unter völliger räumlicher Diffusität das Entstehen von Schallrückwürfen verstanden, die gleichmäßig auf alle Raumwinkel verteilt sind. Sind die Schallwellenlängen größer als die Struktur, kommt es zu

einer Unwirksamkeit dieser und die Reflexionswirkung orientiert sich nach der Grundfläche. Abbildung 1 verdeutlicht die Reflexionswirkungen einer Fläche mit Strukturen der Breite b in Abhängigkeit der Wellenlänge λ . Mit Hilfe von geometrischen gerichteten Reflexionen soll die Schallversorgung von bestimmten Bereichen in Räumen erreicht werden. Gleichzeitig ist es wünschenswert konzentrierte und energiereiche späte Reflexionen, wie beispielsweise Echos, zu vermeiden.

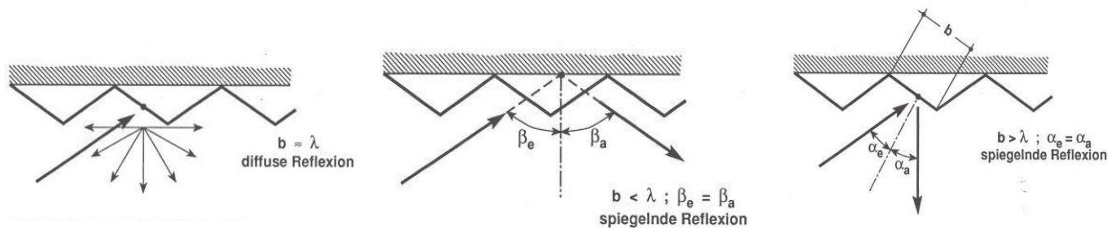


Abbildung 1: Reflexionswirkung einer Fläche mit Strukturen der Breite b in Abhängigkeit der Wellenlänge λ [Fasold 2003]

Die Betrachtungen nach Abbildung 1 stellen Reflexionsvorgänge in Annäherung durch Schallstrahlen als einfache Modellvorstellung idealisiert dar. Allerdings wird hierbei auf die Betrachtung der Beugung einer Welle verzichtet. Ausgehend davon muss stets in Betracht gezogen werden, dass die Abmessungen von Schallhindernissen mindestens mehrere Wellenlängen betragen muss (vgl. [Meyer 2015], Kap. 5.1.3). Um Abschattungseffekten entgegen zu wirken, können die Überlegungen zur Auslegung eines Schallschirmes herangezogen werden. Häufig wird in großen Auditorien oder Konzertsälen von gezielten Reflexionsvorgängen zur Schallführung Gebrauch gemacht. Im Interesse dieser Überlegungen steht die Frage, oberhalb welcher Frequenz die Reflexionen wirksam werden. Mit Gleichung (3.1.2.1) nach [Cremer 1978] können Abschätzungen für die untere Grenzfrequenz eines reflektierenden Elementes durchgeführt werden, wobei mit a_1 die Entfernung der Schallquelle von der Mitte des Reflektors, mit a_2 der Abstand vom Hörer, mit b die Breite des Reflektors und mit ϑ der Einfallswinkel gemeint ist:

$$f_u = \frac{2c}{(b \cos \vartheta)^2} \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} \quad (3.1.2.1)$$

Die vorangegangenen Überlegungen beziehen sich vorwiegend auf den Schalleinfall auf ebenen Flächen. Bei der Betrachtung von Rundbogendecken kann es durch die konkave Krümmung zu stark ausgeprägten Fokussierungs- oder Zerstreuungseffekten des Schalls kommen. Dies ist jedoch abhängig von dem Abstand der Schallquelle zur Wand und dem Krümmungsradius. Nach den Hohlspiegelgesetzen sind vier Grenzfälle zu unterscheiden, wie in Abbildung 2 auf der nachfolgenden Seite nach [Meyer 2015]

verdeutlicht wird. In Fall a befindet sich die Schallquelle weiter als um den halben Krümmungsradius von der Wand entfernt. Es kommt zu einem Brennpunkt jenseits des Krümmungsmittelpunktes, was sich als negativ ausbildet, wenn die Schallkonzentration in den Zuhörerbereich fällt. Ein paralleles Strahlenbündel entsteht, wenn der Abstand der Schallquelle gleich dem halben Krümmungsradius entspricht, wie in b ersichtlich. Ähnlich wie bei konvexen Krümmungen kommt es in Fall c zu einer Zerstreuung, welche für eine gleichmäßige Energieverteilung des Schallfeldes von Vorteil sein kann. Ist die Schallquelle außerhalb der Achse des Reflektors, wie in d zu sehen ist, kommt es bei halben Krümmungsradius zu einer parallelen Strahlenbündelung, welche jedoch schräg zur Achse gerichtet ist. Wie zu erkennen ist, verliert die Schallquelle ausgehend von der Sendeseite ihre Energie zu der an der Achse gespiegelten Seite.

Unabhängig der Reflexionsrichtung ist es zu beachten, dass Raumbegrenzungsflächen nur dann reflektieren, wenn ihre Masse genügend schwer ist. Je tiefer die Frequenzen, welche reflektiert werden sollen, sind, desto größer sollte die erforderliche flächenbezogene Masse ausfallen. Nach [Fasold 2003] genügen für die Reflexion von Sprache circa 10 kg/m^2 und für musikalische Darbietungen in etwa 40 kg/m^2 .

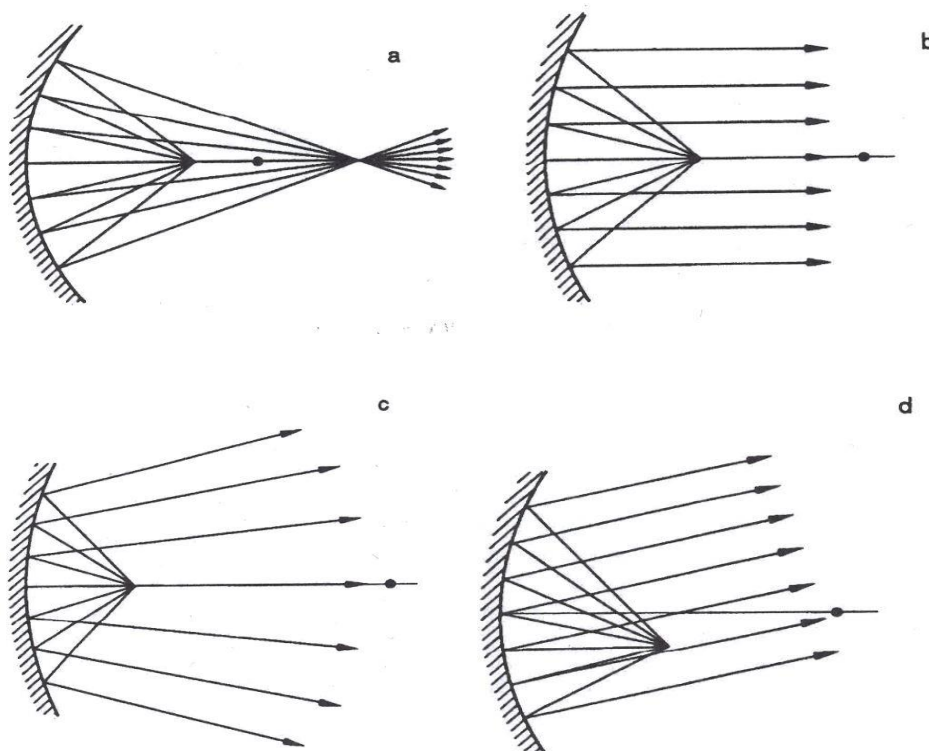


Abbildung 2: Reflexion an gewölbten Flächen nach [Meyer 2015]

Ist eine gleichmäßige Verteilung von reflektierenden Schallstrahlen in alle Raumwinkel gefordert, sind Räume mit diffusen Reflexionsmechanismen und Strukturen auszustat-

ten. Die Beschreibung dieser Strukturen wird mittels eines Streugrades und eines Diffusitätsgrades erreicht, welcher das Verhältnis der gestreuten Energie zur Gesamtenergie kennzeichnet. Dabei tragen reflektierte Schallstrahlen, deren Ausfallswinkel um mehr als $\pm 10^\circ$ von der Richtung der geometrisch gerichteten Reflexion abweichen, zur gestreuten Energie bei. Diffusitätsgrade und Streugrade nehmen Werte von 0 bis 1 an, wobei 1 eine gleichmäßige Verteilung der Reflexionen und keine reflektierte Energie in Richtung der spiegelnden Reflexionen meint. Werte gegen 0 beschreiben in diesem Zusammenhang geometrisch gerichtete Reflexionen (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.1.5.2).

Mit der richtigen Anwendung von geometrisch gerichteten Reflexionen kann gezielt auf die Schallverteilung in Räumen Einfluss genommen werden, um damit vorwiegend bei größeren Räumen Zuhörerplätze mit ausreichendem Schall zu versorgen. Es können aber auch Schalldruckpegel infolge der Fokussierung der Lautstärke an ungewünschten Stellen im Raum hervortreten.

3.1.3 Äquivalente Schallabsorptionsfläche & Absorptionsgrad

Die Nachhallzeit eines Raumes und die damit einhergehende Verteilung des Schalles in einem Raum können nicht nur über die gezielte Richtwirkung von geometrisch gerichteten Reflexionen beeinflusst werden, sondern auch über den Parameter der äquivalenten Schallabsorptionsfläche. Mit Hilfe dieser können die Sekundärstrukturen eines Raumes zusammengefasst und beschrieben werden. Dabei sind alle in einem Raum befindlichen Gegenstände, sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Wände und Decken als Einfluss nehmende Strukturen zu betrachten, die alle ein gewisses Maß an Absorptionseigenschaften aufweisen. Mit Absorption ist in diesem Zusammenhang der nicht reflektierte Teil eines Schalleinfalls auf eine Oberfläche gemeint und wird mit dem Absorptionsgrad α beschrieben.

Beim Auftreffen eines Schalls, gekennzeichnet durch dessen Schallleistung W_1 , auf eine Oberfläche in einem Raum, wird gewöhnlich ein Teil dieser Leistung reflektiert W_{refl} und der andere Teil der auftreffenden Schallleistung W_{abs} von der Oberflächenstruktur absorbiert (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.1.1). Im Fall der reflektierten Leistung W_{refl} können die Reflexionsvorgänge mit dem Schallreflexionsgrad

$$\rho = \frac{W_{\text{refl}}}{W_1} \quad (3.1.3.1)$$

gekennzeichnet werden. In Analogie zu Gleichung (3.1.3.1) werden bei Absorptionsvorgängen diese durch den Schallabsorptionsgrad gekennzeichnet, der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann.

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_1} \quad (3.1.3.2)$$

Wobei 0 die vollständige Reflexion und 1 die absolute Absorption beschreibt. Aus diesem Zusammenhang gilt

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3.1.3.3)$$

Der Schallabsorptionsgrad kann nicht nur über die reflektierten Energieanteile definiert werden, sondern vielfach auch über die Verluste, die beim Durchtritt durch ein energieentziehendes Medium entstehen. Dies beruht fast ausschließlich auf der Umwandlung von Schallenergie in Wärmeenergie und wird als Dissipation bezeichnet. Neben der Dissipation einer Schallleistung W_{diss} wird auch die Transmission, der Schalldurchgang durch ein Objekt, im Zusammenhang mit der Absorption beschrieben (vgl. [Cremer 1978], Kap. 6). Beispielsweise bei Wänden interessieren die Transmission der Schallleistung W_2 , die bei direkter Übertragung in den Nachbarraum erfolgt, und die Transmission der Schallleistung W_3 , welche die Schallübertragung über die Flankenwege eines Raumes definiert. Der damit einhergehende Schalltransmissionsgrad ergibt sich aus den resultierenden Schallleistungen W_2 und W_3

$$\tau' = \frac{W_2 + W_3}{W_1} \quad (3.1.3.4)$$

Letztlich können mit den Gleichungen (3.1.3.2) und (3.1.3.4) der Zusammenhang des Schallabsorptionsgrades einer Fläche nach [Fasold 2003] wie folgt definiert werden

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_1} = \frac{W_{diss} + W_2 + W_3}{W_1} = \frac{W_{diss}}{W_1} + \tau' \quad (3.1.3.5)$$

Für die Planung von Räumen ist es üblich die Schallabsorptionseigenschaften von Bauteilen und Baustoffen frequenzabhängig anzugeben. Mit diesen Eigenschaften von Materialien kann die Akustik in einem Raum effektiv für den erforderlichen Verwendungszweck angepasst werden. Die Absorption der aufgefallenen Schallenergie, die beim Reflexionsvorgang nicht wieder in den Raum zurückgeworfen wird, wird diesbezüglich vor allem durch die Fläche der absorbierenden Strukturen in einem Raum definiert. Das Produkt des Absorptionsvermögens einer Wandfläche wächst demnach mit der Größe S

$$A = \alpha S \quad (3.1.3.6)$$

worin A als äquivalente Schallabsorptionsfläche gemeint ist (vgl. [Cremer 1978], Kap. 1). Diese frequenzabhängige Modellfläche kennzeichnet nicht nur die Absorptionseigenschaft schallabsorbierender Flächen, sondern auch die von Gegenständen, Personen und Räumen und bildet damit eine grundsätzliche Darstellungsweise für die Betrachtung und Bewertung von raumakustischen Eigenschaften. Durch eine Summierung der unterschiedlichen Begrenzungsflächen S_i und der jeweiligen Schallabsorptionsgrade α_i wird ein gleichwertiger Modellraum geschaffen, welcher nur reflektierende Begrenzungsfläche besitzt, ausgenommen einer vollständig absorbierenden Teilfläche der Größe A (vgl. [Fasold 2003], Kap 4.1.1)

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots = \sum \alpha_i S_i \quad (3.1.3.7)$$

Für einige Einrichtungsgegenstände oder einzelne Personen können die Schallabsorptionseigenschaften nicht durch Flächen mit einem Schallabsorptionsgrad α_i bezeichnet werden. Im Allgemeinen werden diese Objekte durch normgerechte Messung in Hallräumen erfasst und werden im Folgenden mit der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A_j bezeichnet. Da diese Schallabsorptionsflächen ebenfalls zur gesamten äquivalenten Schallabsorptionsfläche beitragen, müssen diese auch in der statistischen Planung und Berechnung berücksichtigt werden. Bei weiterer Betrachtung der Schallausbreitung, findet in vorwiegend großen Räumen eine nicht zu vernachlässigende Luftabsorption statt. Mit Hilfe der Energiedämpfungskonstante m , welche eine von Temperatur, Luftfeuchte und Frequenz abhängige Größe darstellt, und des Raumvolumens V können diese Einflüsse mit Gleichung (3.1.3.7) zur resultierenden äquivalenten Schallabsorptionsfläche A eines Raumes zusammengefasst werden (vgl. [Fasold 2003], Kap 4.1.1)

$$A_{res} = \sum \alpha_i S_i + \sum A_j + A_L \text{ mit } A_L = 4Vm \quad (3.1.3.8)$$

Einhergehend mit der Eigenschaft der Frequenzabhängigkeit des Absorptionsgrades werden breitbandige Schallanteile nicht von ein und demselben Material in gleicher Stärke absorbiert oder reflektiert. Hierfür gibt es in der praktischen Anwendung eine Vielzahl von unterschiedlichen akustisch wirksamen Materialien und Wirkungsmechanismen zur Reduzierung der Nachhallzeit und Bildung der Hörsamkeit in Räumen. Die zwei nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich Eingängig mit den Wirkungsweisen und den Aufbauten von technischen Schallabsorbern und Resonatoren in Hinblick auf die Verwendung dieser in Kombination.

3.1.4 Passive Absorber

Das Einsatzgebiet von technischen Schallabsorbern bzw. schallabsorbierenden Einbauten befindet sich vorwiegend in der Destruktion von störenden Schallreflexionen an schallharten Begrenzungsflächen und der Verkürzung von zu langen Nachhallzeiten in Räumen. Mit einer sehr hohen Anwendungsbreite positionieren sich passive Absorber, wie offenporige Schaumstoffe, geblähte Baustoffe oder faserige Materialien, als einfache und effektive Variante zur Reduzierung von Schall. Diese eignen sich jedoch nur für die Absorption hochfrequenter Anteile in Schallereignissen.

Der physikalische Wirkungsmechanismus, der passiven Absorbern zu Eigen wird, erklärt sich wiederum aus der Dissipation von Schallenergie in Wärme. Dabei bedeutet eine gute Schallabsorption die Anpassung der Impedanz des porösen Materials \underline{Z}_2 an die Kennimpedanz der Luft \underline{Z}_1 . Die Schallreflexion an Grenzschichten bildet hierfür die Modellvorstellung. In der Trennebene gilt die Beziehung, dass eine auftreffende Schallwelle mit dem Schalldruck \underline{p}_e auf ein anderes Medium in eine durchgelassene Schallwelle \underline{p}_d und in eine reflektierende Schallwelle \underline{p}_r aufgeteilt wird (vgl. [Schirmer 2006], Kap. 6.2.1). Der als Schallreflexionsfaktor definierte Begriff erklärt das Verhältnis zwischen reflektiertem Schalldruck und auftreffendem Schalldruck

$$\underline{R} = \frac{\underline{p}_r}{\underline{p}_e} \quad (3.1.4.1)$$

und steht in folgendem Zusammenhang mit dem Schallabsorptionsgrad:

$$\alpha = 1 - |\underline{R}|^2 \quad (3.1.4.2)$$

Um die Wirkungsweise transparenter zu gestalten, erklärt sich der Zusammenhang der Impedanzen unterschiedlicher Materialien mit dem Schallreflexionsfaktor. Hierbei ist dieser umso größer, je mehr sich die Impedanzen $\underline{Z}=\underline{p}/\underline{v}$ unterscheiden. Nach [Schirmer 2006] gilt:

$$\underline{R} = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1} \quad (3.1.4.3)$$

Dabei wird die Impedanz \underline{Z}_2 von drei frequenzunabhängigen Stoffkennwerten des porösen Materials, dem längenbezogenen Strömungswiderstand Ξ , der Porosität σ und dem Strukturfaktor χ , bestimmt. Reibungsverluste, die innerhalb der Grenzschicht zwischen der in den Poren des porösen Materials bewegten Luft und dem ruhenden Ge-

füge desselben entstehen, werden mittels des längenbezogenen Strömungswiderstandes gekennzeichnet (vgl. [Schirmer 2006], Kap. 6.2.2.1).

$$\varepsilon = -\frac{\Delta p}{v\Delta x} \quad (3.1.4.4)$$

Die hierbei verwendeten Einheiten beschreiben das Verhältnis einer entstehenden Druckänderung Δp über eine Strecke Δx , wenn eine Luftgleichstrmung der Geschwindigkeit v durch das poröse Material geschieht (vgl. [Fuchs 2017], Kap. 4). Die Porosität setzt das akustisch wirksame Luftvolumen in den Poren V_L und das Gesamtvolumen des porösen Absorbers V_A in ein Verhältnis:

$$\sigma = \frac{V_L}{V_A} < 1 \quad (3.1.4.5)$$

Der Strukturfaktor bildet sich aus dem an der Kompression beteiligten Luftvolumen V_K und dem an der Beschleunigung beteiligten Luftvolumen V_B nach [Fuchs 2017]:

$$\kappa = \frac{V_K}{V_B} \geq 1 \quad (3.1.4.6)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (3.1.4.4), (3.1.4.5) und (3.1.4.6) kann nun der Widerstand \underline{Z}_2 berechnet werden:

$$\underline{Z}_2 = \varrho c \frac{\sqrt{\kappa}}{\sigma} \sqrt{1 - j \frac{\varepsilon \sigma}{\omega \varrho \kappa}} \quad (3.1.4.7)$$

Die vorangegangenen Betrachtungen beziehen sich auf poröse Absorber mit einer hinreichend großen Schichtdicke. In der praktischen Anwendung jedoch sollte ein Bereich optimaler Anpassung der Stoffkennwerte an das zu erwartende Schallfeld passieren. In Hinblick auf den längenbezogenen Strömungswiderstand sollte dieser so gewählt werden, um eine optimale Schallabsorption zu erzielen. Wird die Dämmschichtdicke größer, sollte der längenbezogene Strömungswiderstand nach Gleichung (3.1.4.4) kleiner gewählt werden (vgl. [Fasold 2003], Kap 4.1.2.1). Der schematische Verlauf des Schallabsorptionsgrades α poröser Stoffe bei optimalen spezifischen Strömungswiderstand Ξ ist in Abbildung 3 ersichtlich und verdeutlicht, dass das Absorbieren von tiefen Frequenzanteilen mit der Vergrößerung der Dämmschichtdicke einhergeht.

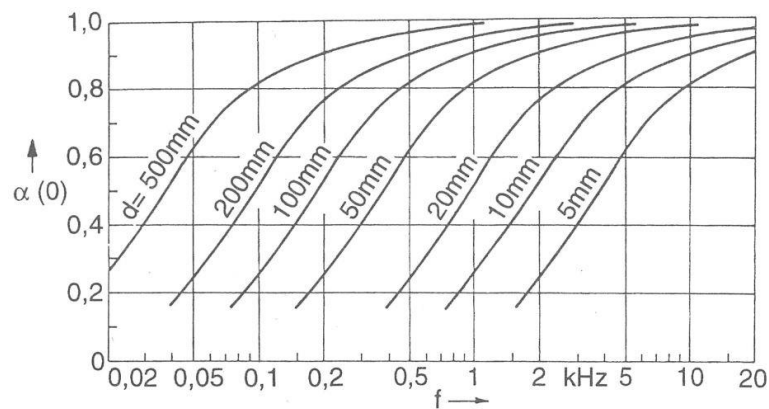


Abbildung 3: Einfluss der Absorberschichtdicke d auf den Schallabsorptionsgrad bei Anordnung eines homogenen porösen Absorbers unmittelbar von schallharter Wand [Schirmer 2006]

Letztlich entscheiden nicht nur die Stoffeigenschaften und die Dämmschichtdicke eines passiven Absorbers über deren Schallabsorption, sondern auch der Anbringungsort im Raum. Die untere Grenzfrequenz, bei der ein passiver Absorber wirksam werden soll, ist dafür ausschlaggebend und sollte sich im Abstand einer viertel Wellenlänge vor einer reflektierenden Wandfläche befinden. Geschuldet den Raummoden ist in diesem Abstand ein Gebiet der maximalen Schnelle zu erwarten. Die vor auszusehenden Reibungsverluste der sich in den Poren bewegenden Luftteilchen sind bei großer Schnelle höher. Die damit einhergehende schallabsorbierende Wirkung wird größer, bewegt sich jedoch in einem schmalen Frequenzbereich, etwa dem von Oktavbandbreite (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.1.2.1). Der Abstand in Bezug auf die untere Wirkfrequenz eines porösen Absorbers kann mit der folgenden Gleichung näherungsweise berechnet werden:

$$d_L = \frac{\lambda}{4} = \frac{8500}{f} \quad (3.1.4.8)$$

Die passiven Absorber bilden eine vielversprechende Möglichkeit die Hörsamkeit eines Raumes anzupassen, sind jedoch durch ihren physikalischen Wirkmechanismus und die entsprechende Auskleidungsdicke zur Reduzierung von tiefen Frequenzanteilen in Räumen eher minder verwendungsfähig. Deshalb werden die meisten porösen Schichten fast immer mit schalltransparenten Verblendungen an Wand oder Decke angebracht. Dies bietet nicht nur eine optisch ansprechendere Oberfläche, sondern hat den Vorteil, dass diese Kombination bei richtiger Auslegung den Frequenzbereich des Systems zu den tiefen Frequenzen hin vergrößert.

3.1.5 Reaktive Absorber

Reaktive Absorber oder Resonanzabsorber übertragen die Schallenergie zunächst in eine andere Energieform, als es bei passiven Absorbern mit der Umwandlung in Wärme der Fall ist. Diese sog. Plattenschwinger bestehen meist aus dünnen Platten, welche in einem definierten Abstand d_L vor Wänden und Decken installiert werden. Die Anbringung vor einem abgeschlossenen Luftvolumen hat dabei den Zweck, diesen in Verbindung mit der Masse der Platte als Feder zu nutzen. Ein solches Masse-Feder-System entzieht dem Schallfeld dort Energie, wo es seine Resonanzfrequenz hat (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.1.2.2). Dabei wird der Resonator durch Anregung in seiner Eigenfrequenz selbst zu einer Schallquelle, die aber gegenphasig zum anregenden Schall schwingt. Aus dieser gegenphasigen Überlagerung der beiden Schallanteile folgt schließlich durch Interferenz eine Absenkung des daraus resultierenden Schalldruckes (vgl. [Veit 2017]). Dem Schallfeld wird quasi eine undurchlässige Schicht entgegengesetzt, deren flächenbezogene Masse m'' groß gegenüber der in der auftreffenden Welle mitbewegten Luftmasse ist (vgl. [Fuchs 2017], Kap. 5). Die Auslegung von Resonanzabsorbern verfolgt das Ziel das Maximum der Schallabsorption in die Bereiche der tiefen Frequenzen zu verlagern. Mit Zuhilfenahme von porösen Dämmstoffen innerhalb des Luftvolumens kann die Resonanz des Systems insofern verändert werden, sodass dieses breitbandiger wird und die Schallabsorption im Maximum etwas abnimmt (vgl. [Nocke 2014], Kap 3.4.2). Beispielhaft sind dünne Sperrholzplatten, Spanplatten, Metallplatten, Gipskartonplatten, aber auch Glasscheiben, Membranen und Folien zu nennen. Die Resonanzfrequenz f_0 bei maximaler Absorption kann näherungsweise nach Gleichung (3.1.5.1) berechnet werden

$$f_0 \approx 510 \frac{1}{\sqrt{m'' d_L}} \quad (3.1.5.1)$$

Ausschlaggebend für das gewählte Material sollte die Fähigkeit sein Schwingungen ausbilden zu können. Die akustische Feder wirkt bei einem Plattenschwinger nur dann, wenn der Abstand zwischen Plattenrückseite und Wand d_L klein gegenüber der Wellenlänge λ im Resonanzfall ist (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.1.2.2)

$$d_L \leq \frac{\lambda}{12} \leq \frac{2800}{f_0} \quad (3.1.5.2)$$

Unter Verwendung von luftdurchlässigen Platten, die meist eine regelmäßig verteilte Öffnung in Form von Kreisen, Quadraten und Schlitzten aufweisen, besteht eine weitere Variante zum Aufbau von Resonanzabsorbern. Das Absorptionsverhalten eines sog. Lochplattenschwingers ist abhängig von der Größe des Lochflächenverhältnisses ϵ und

des dahinter eingebrachten Dämmstoffes. Die sog. Halbwertsfrequenz $f_{0,5}$ erklärt das Absinken des Transmissionsgrades auf den Wert 0,5 und berechnet sich aus der Beziehung des Lochflächenverhältnisses ε und der wirksamen Plattendicke t_{eff} nach [Fasold 2003] wie folgt:

$$f_{0,5} = 1500 \frac{\varepsilon}{t_{eff}} \quad (3.1.5.3)$$

mit der wirksamen Plattendicke

$$t_{eff} = t + 2\Delta t \quad (3.1.5.4)$$

Daraus resultierend kann nun die wirksame Lochmasse m'_L , die Masse der in den Löchern mitschwingenden Luft, ermittelt werden, um anschließend die Resonanzfrequenz des Lochplattenschwingers nach Gleichung (3.1.5.1) zu berechnen:

$$m'_L \approx \frac{0,12 t_{eff}}{\varepsilon} \quad (3.1.5.5)$$

Für die Dämpfung eines solchen Schwingensystems können herkömmliche Dämpfungsmaterialien herangezogen werden. Effizienter jedoch ist das Aufspannen eines optimalen Strömungswiderstandes, beispielsweise ein akustisch wirksames Faser-Vlies, unmittelbar vor oder hinter den Löchern (vgl. [Fuchs 2017], Kap. 6). Werden sehr dünne Platten mit sehr kleinen Öffnungen verwendet, können diese auch ohne einen Dämmstoff im Luftzwischenraum wirksam werden. Diese sog. mikroperforierten Schallabsorber erzeugen Reibungsverluste in den engen Löchern (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.1.2.2).

Die Wirkweise von Lochplattenschwingern kann prinzipiell auch am Beispiel des Helmholtz-Resonators vereinfacht werden. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Feder-Masse-System, welches über einen Resonatorhals und einem Resonatorvolumen die eingeschlossene Luft als Feder verwendet. Einzeln verwendet können mittels Helmholtz-Resonatoren gezielt tiefe Frequenzen in einem sehr schmalen Frequenzband dezimiert werden. Dessen Resonanzfrequenz wird durch die Fläche des Resonatorhalsquerschnittes S , das Resonatorvolumen V , die Resonatorhalslänge t und einer Mündungskorrektur $2\Delta t$ bestimmt (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.1.2.3)

$$f_0 \approx 170 \sqrt{\frac{S}{V(t + 2\Delta t)}} \quad (3.1.5.6)$$

Die Anordnung von mehreren Helm-Holtz-Resonatoren zu einem flächenhaften Absorberkollektiv bewirkt eine gegenseitige Wechselwirkung zwischen den einzelnen Absorbern. Die Parallelschaltung von vielen Helm-Holtz-Resonatoren ergibt wiederum eine Art Lochplattenabsorber [vgl. (Veit 2017)]. Die Kombination von reaktiven und porösen Absorber schafft letztlich die Voraussetzung für eine breitbandige Absorption. In Abbildung 4 wird das Zusammenwirken von zwei unterschiedlichen Absorbertypen über den Frequenzgang von 125 Hz bis 8 kHz dargestellt.

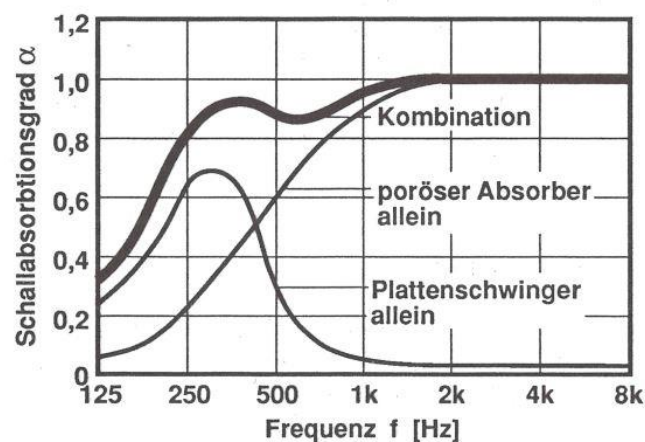


Abbildung 4: Kombiniertes Schallabsorber für breitbandige Wirkung [Fasold 2003]

Im Zusammenhang mit den reaktiven Absorbern und der Resonanzfrequenz soll im nachfolgenden Kapitel auf das Schwingungsverhalten zweischaliger Bauteile näher eingegangen werden.

3.1.6 Schwingungsverhalten zweischaliger Bauteile

Da Räume durch ihre Konstruktionsweise, ob Massivbau oder Trockenbau, ein eigenes Schwingungsverhalten aufweisen können tragen diese erheblich zur Schalldämmung und der entstehenden Nachhallzeit bei. Im Hinblick auf die Untersuchung der Raumbegrenzungsflächen des Musiksaals des Deutschen Museums als akustisch wirksame Strukturen ist das Schwingungsverhalten zweischaliger Bauteile näher zu betrachten.

Bei Anordnung zweier einschaliger Bauteile in einem bestimmten Abstand hintereinander, wirkt dieses Gefüge als Gesamtsystem. Durch Kopplung der beiden Schalen kann die Schalldämmung der Bauteile, beeinflusst durch das eingeschlossene Luftpolster, eine eingebrachte Dämmschicht oder über die konstruktive Verbindung, erhöht werden. Ähnlich wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, kann eine solche Konstruktion mit einem

Schwingungssystem aus zwei Massen und einer sie verbindenden Feder verglichen werden. Interessierend ist vor allem die sog. Masse-Feder-Resonanz dieses Systems. Diese Resonanzfrequenz kann durch die flächenbezogenen Massen der beiden Schalen und der Dicke des Luftzwischenraumes ermittelt werden. Zuerst ist nach Gleichung (3.1.6.1) bei Kenntnis des Volumens und des Gewichtes die Dichte für ein Material zu berechnen:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.1.6.1)$$

Anschließend kann mit Hilfe der Dichte die flächenbezogene Masse eines Objektes wie folgt errechnet werden:

$$m'' = \rho l \quad (3.1.6.2)$$

Die Masse-Feder-Resonanz des Schwingungssystems aus zwei Massen mit einem Luftzwischenraum ist damit durch folgende Beziehung gegeben:

$$f_0 = \frac{10^3}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m''_1} + \frac{1}{m''_2} \right)} \approx 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m''_1} + \frac{1}{m''_2} \right)} \quad (3.1.6.3)$$

Darin beschreibt s' die dynamische Steifigkeit der Feder, im Falle der Luft wird diese je nach Abstand nach folgender Beziehung berechnet

$$s'_L = \frac{p_L c_L^2}{d_L} \quad (3.1.6.4)$$

und m''_1 , m''_2 die unterschiedlichen flächenbezogenen Massen der Wandschalen in kg/m^2 (vgl. [Fasold 2003], Kap. 5.2.1.3). Mittels Bestimmung der Resonanzfrequenz zweischaliger Bauteile kann das Verhalten eines Raumes hinsichtlich der raumakustischen Eigenschaften und der Hörsamkeit abgeschätzt werden.

Ebenfalls können im Bereich des Luftzwischenraumes beider Schalen Resonanzen auftreten. Je nach Schalenabstand entstehen diese Hohlraumresonanzen bei höheren oder bereits bei mittleren Frequenzen, die wiederum auf die Eigenschwingungen des Hohlraums zurückzuführen sind (vgl. [Gösele 1997], Kap. 4.2.1.2). Wird der Abstand von zweischaligen Bauteilen zu groß gewählt, kann unter Umständen durch die Resonanzeigenschaften von Teilen der Wände eine Verschlechterung der Dämmung auftreten. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, empfiehlt es sich die Zwischenräume mittels eines porösen Dämmstoffes zu füllen, der die Steifigkeit der Luftschicht vermin-

dert und gleichzeitig die Hohlraumresonanzen verringert (vgl. [Fasold 2003], Kap. 5.2.1.3).

Interessierend für die räumliche Resonanz ist der sog. Koinzidenzeffekt von Bauteilen. Die Schalldämmung von einschaligen, homogenen Wänden ist vor allem vom Gewicht der Wände je Flächeneinheit abhängig. Folglich kann erwartet werden, dass die Schalldämmung stetig mit der Masse ansteigt. Jedoch ausschlaggebend für den Koinzidenzeffekt in nicht nur die Masse, sondern auch die Biegesteifigkeit eines Materials (vgl. [Gösele 1997], Kap. 4.2.1.2). Unter Koinzidenz oder Spuranpassung wird der Zustand eines Bauteiles verstanden, bei dem die Wellenlänge von freien BiegeWellen λ_B mit der auf die Bauteiloberflächen projizierten Wellenlänge λ_0 des einfallenden und abgestrahlten Luftschalles übereinstimmt. Dies meint, dass die Wellenlängen λ_0 und λ_B bei einer bestimmten kritischen Frequenz f_c , der sog. Koinzidenzgrenzfrequenz, gleich groß sind (vgl. [Möser 2015], Kap. 4.5.1). Diese stellt ein räumliches Pendant zur Resonanz dar. Die Impedanz verschwindet, wenn die zeitliche Periode der Erregung gleich derjenigen einer freien Schwingung ist, was wiederum einen quasi Totaldurchgang der Schallwelle bedeutet. Durch selektives Auftreten hinsichtlich der Frequenz und des Einfallswinkels sollte der Koinzidenzeffekt auch in raumakustischen Betrachtungen eher vermieden werden. Beispielsweise empfiehlt es sich bei ausgedehnten Rabitz-Decken, wie im vorliegenden Fall, diese in ihren Dicken zu variieren (vgl. [Cremmer 1976], Kap 10). Für die Erkenntnis der Spuranpassung im raumakustischen Sinne sind vorwiegend auch die Betrachtungen von Platten, welche als biegeWeiche unporige Abdeckungen, beispielsweise als Holzvertäfelungen, zum Einsatz kommen, wichtig. Die Bestimmung der Koinzidenz kann über das Gleichsetzen der Spurwellenlänge und der freien BiegeWelle erfolgen:

$$\frac{\lambda_0}{\sin \vartheta} = \lambda_B \quad (3.1.6.5)$$

Geschuldet der Tatsache, dass $\sin \vartheta$ nicht größer als 1 werden kann, beschränkt die Koinzidenzgrenzfrequenz das Auftreten der Koinzidenz oberhalb f_c :

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B'}} = \frac{c_0^2}{2\pi t} \sqrt{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{E}} \approx \frac{6,4 \cdot 10^4}{t} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (3.1.6.6)$$

Vorwiegend in der Bauakustik antreffend, spielt die Koinzidenzgrenzfrequenz für die raumakustische Betrachtung eher eine zweitrangige Rolle. Die Abstrahlung durch eine Platte jedoch sollte aber auch für die raumakustischen Untersuchungen ein gewisses Maß an Erkenntnis über die Zusammenhänge erfahren.

3.1.7 Raumakustische Kriterien

Für die Beschreibung von Räumen im akustischen Sinne stehen unterschiedlichste Güte Merkmale zur Verfügung. Dabei ist die Halligkeit eines Raumes wohl die auffälligste akustische Eigenschaft und wird als Kriterium der Nachhallzeit für die Beurteilung der akustischen Qualität eines Raumes stets als wichtigstes Merkmal herangezogen. Dennoch existieren weitere Gütekriterien, welche sich vornehmlich als Verhältnisse zeitlicher und bei Musik auch räumlicher Verteilung der an den Zuhörerorten eintreffenden Schallenergien darstellen. Dem Energieanteil der Anfangsreflexionen, welche dem Direktschall in kurzem zeitlichen Abstand folgen, bei Sprache bis etwa 50 ms, bei Musik bis etwa 80 ms, wird hierbei eine wichtige Eigenschaft zu teil (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.2.1).

Unter Betrachtung der raumakustischen Kenngrößen lässt sich feststellen, dass diese prinzipiell in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Die erste Gruppe beschreibt die Kenngrößen, welche sich auf den Raum als Gesamtheit beziehen. Die Nachhallzeit, als statistische Theorie, kann hierfür genannt werden. Für die zweite Gruppe von raumakustischen Kriterien wird die Konstellation von Schallquelle und –empfänger im Raum näher betrachtet. Beispielweise zeigt sich der Sprachübertragungsindex eine Positionsabhängigkeit und kann damit als nicht-statistische Kenngröße gekennzeichnet werden (vgl. [Nocke 2014], Kap. 4).

Mit Hilfe der Volumenkenzahl k eines Raumes wird der Einfluss der Absorption durch die im Raum vorhandenen Menschen berücksichtigt. Dabei wird diese Kennzahl in Kubikmeter pro Platz angegeben und wird nach Tabelle 4.1 in [DIN 18041] beschrieben. Geringe Volumenkenzahlen bedeuten, dass durch die in einem Raum befindlichen Personen ein hoher Anteil der Absorption, vor allem bei hohen und mittleren Frequenzen, besteht. Daher sollten Tiefenabsorber die Absorption des Raumes ergänzen. Im Bereich der mittleren Volumenkenzahlen ist das Absorptionsverhalten der Personen noch vorwiegend präsent, sollte je nach Höhe der Volumenkenzahl durch ausreichende Absorption, auch in mittleren und hohen Frequenzlagen, ergänzt werden. Ab 8 m^3 pro Platz sind stets zusätzliche Absorber in den Raum einzubringen, der Einfluss des Menschen im Raum dominiert nicht mehr (vgl. [Nocke 2014], Kap 4.1). Die Volumenkenzahlen sind ausschlaggebend für die zu erzielenden Nachhallzeiten eines Raumes. Bei Überschreitung können umfangreiche absorbierende Maßnahmen von Nöten sein, woraus wiederum resultiert, dass der Schalldruckpegel an der Hörerposition zu stark reduziert wird und dieser nicht mit ausreichendem Pegel versorgt wird. Nachteilig wirkt sich dies bei Entfernungen von Sprecher zu Hörer ab 8 m aus. Bei zu niedriger Volumenkenzahl kann es zu einer Unterschreitung der Nachhallzeit kommen, die wiederum Musikdarbietungen negativ beeinflusst (vgl. [DIN 18041], Kap. 5.2).

Die Nachhallzeit T ist das wohl markanteste Kriterium für die Beschreibung der akustischen Verhältnisse in Räumen und eignet sich ideal für die statistische Betrachtung. Darunter versteht man die Zeit, in der nach Beenden der Schallabstrahlung in einem Raum der Schalldruck auf ein Tausendstel seines Ausgangswertes, der Schalldruckpegel um 60 dB, gesunken ist (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.2.2). Für die Ermittlung der Hörsamkeit eines Raumes und dessen Nachhall ist die Kenntnis über das Volumen des Raumes und die in Kapitel 3.1.3 beschriebene äquivalente Schallabsorptionsfläche nötig. Mit den Gleichungen (3.1.3.7) und (3.1.3.8) berechnet sich die Nachhallzeit T nach Sabine wie folgt:

$$T = \left(0,163 \frac{s}{m}\right) \frac{V}{A + 4mV} \approx 0,163 \frac{V}{A} \quad (3.1.7.1)$$

Laut [Fasold 2003] liegen die optimalen mittleren Nachhallzeiten für Sprache näherungsweise bei 1 s und für musikalische Darbietungen bei 2 s. Der Frequenzverlauf der optimalen Nachhallzeit für Sprache sollte möglichst linear verlaufen, während in Räumen für Musikdarbietungen ein Anstieg der Nachhallzeit in den tiefen Frequenzen unterhalb von 250 Hz erwünscht ist. Aufgrund der anatomischen Bauweise des Gehörs des Menschen ist dieses für tiefere Frequenzen unempfindlicher als für Hohe. Das sog. Bassverhältnis BR gibt eine objektive Einflussgröße an, deren Optimalwerte zwischen 1,1 und 1,5 bei Konzertsälen liegen sollte. Hierbei werden die Nachhallzeiten von 125 Hz und 250 Hz addiert und durch die Summe der Nachhallzeiten von 500 Hz und 1000 Hz dividiert (vgl. [Fuchs 2017], Kap. 11.6).

Abbildung 5 zeigt die optimalen mittleren Nachhallzeiten T_m bei 500 bis 1000 Hz für unterschiedliche Raumfunktionen in Abhängigkeit vom Raumvolumen. Werden diese überschritten, so kann es beispielsweise bei Sprache passieren, dass nachfolgende Silben durch den längeren Abklingvorgang durch vorhergehende verdeckt werden, woraus resultierend die Sprachverständlichkeit vermindert wird. In der Musik bedeutet ein zu langer Abklingvorgang das Überdecken von Klängen vor allem in tiefen Lagen (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.2.2).

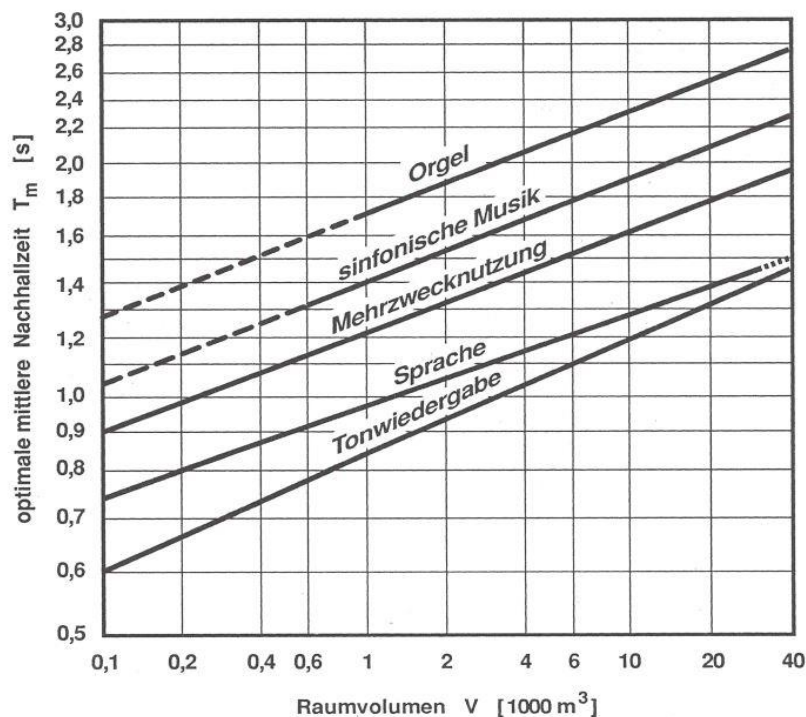


Abbildung 5: Optimale mittlere Nachhallzeiten T_m bei 500 bis 1000 Hz für verschiedene Raumfunktionen in Abhängigkeit vom Raumvolumen V [Fasold 2003]

Laut Definition wird die Nachhallzeit um diejenige bezeichnet, in welcher der Schallpegel um 60 dB gegenüber dem Anfangswert absinkt. Jedoch ist ein derartiger Dynamikumfang in der praktischen Anwendung bei Messungen nicht immer möglich. Aus diesem Grund gibt es Messverfahren, bei dem der Abfall um 30 dB ausgehend von einem Wert von 5 dB unter dem Dauerpegel ausgemessen und die erhaltene Zeit extrapoliert wird (vgl. [Meyer 2015], Kap. 5.3). Um Räume mit niedrigen Nachhallzeiten, wie beispielsweise Tonstudios abzubilden, empfiehlt es sich die Verwendung der Eyring Nachhallformel. Ausgehend von der Tatsache, dass der Nachhall nicht exponentiell abklingt und er von der Raumgestaltung unbeeinflusst bleibt, bietet die Korrektur zur Eyring'schen Formel eine etwas genauere Berechnungsmöglichkeit (vgl. [Cremer 1978], Kap 2).

$$T_{Eyr} = 0,163 \frac{V}{-\ln(1 - \alpha_{Raum}) S_{ges}} \quad (3.1.7.2)$$

Neben der klassischen statistischen Methode der Nachhallzeitvorausberechnung kann die Hörsamkeit eines Raumes über dessen Raumimpulsantwort beobachtet und gemessen werden. Hierbei wird mittels eines Reflektogrammes der schematisierte zeitliche Verlauf der eintreffenden Schallenergien dargestellt. Mit Hilfe der Impulsantwort werden die Verhältnisse des Direktschalls, das quasi Direktsignal, die Anfangsreflexio-

nen und der Energieabbau des Nachhalls schematisch voneinander getrennt, abgebildet. Die Nachhallzeit kennzeichnet dabei den Abklingvorgang der statistisch verteilten späten Reflexionen. Die Impulsantwort prädestiniert sich als wesentliches Merkmal für die Qualität und die Beurteilung eines Zuhörerplatzes. Für ein vernünftiges Ergebnis ist dafür zu sorgen, dass der Direktschall ungestört den Zuhörer erreicht (vgl. [Fasold 2003], Kap 4.3.2.4). Aus ihr lassen sich die nachfolgenden aufgeführten Gütekriterien ableiten, sowie die Erkenntnis über störende Anteile, wie Echos, im Signal erhalten.

Die Anfangsreflexionen, welche etwa 80 % der Gesamtenergie eines Impulses enthalten, entscheiden über den Großteil der subjektiv wahrgenommenen Klangeindrücke. Auf einfache Weise können die Teilenergiewerte, beispielsweise 50ms und 80ms nach dem Direktsignal, dem Energie-Zeit-Verlauf entnommen werden. Dabei besteht eine Abhängigkeit zwischen dem Genre der Darbietungen und der Einschwingzeit. Eine klangliche und zeitliche Differenzierbarkeit der einzelnen Teilsignale innerhalb eines komplexen Hörereignisses wird als Durchsichtigkeit bezeichnet (vgl. [Ahnert 1993], Kap. 3.1.2.2).

Maßgeblich für die Erkennbarkeit zeitlich aufeinander folgender Töne und die Unterscheidbarkeit von verschiedenen Instrumenten gibt das sog. Klarheitsmaß die bis 80ms nach dem Direktschall eintreffende Energie im Verhältnis zur nachfolgenden an. Als objektive Beurteilungsgröße kann so die Durchsichtigkeit bei musikalischen Darbietungen in einem Raum gekennzeichnet werden. Das Klarheitsmaß C_{80} berechnet sich aus dem Verhältnis des Schalldrucks bis 80ms und des Schalldruck nach 80ms in Dezibel:

$$C_{80} = 10 \lg \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.1.7.3)$$

Laut [Fasold 2003] liegen geeignete Werte für das Klarheitsmaß bei Orchestermusik zwischen -1 dB und + 3 dB. Andere Autoren wie [Ahnert 1993] und [Meyer 2015] verweisen für die Wiedergabe von traditioneller Musik auf Klarheitsmaße von $C_{80}=(4\pm2)$ dB, für weiter entferntere Zuhörerplätze auch Werte bis -5 dB. Die [DIN EN ISO 3382-1] beschreibt in Tabelle A.2 den üblichen Bereich für wahrnehmbare Transparenz des Schalls zwischen -5 dB bis +5 dB. Hierbei wird jedoch darauf verwiesen, dass geringere Werte des Klarheitsmaßes für Musik mit schnelleren Läufen gelten, welche eine hohe Durchsichtigkeit benötigen, und große Werte eher für getragene musikalische Darbietungen, wie Chormusik günstiger sind (vgl. [Ahnert 1993], Kap.3.1.2.3). Es lässt sich schlussfolgern, dass das Klarheitsmaß ein objektives Bewertungskriterium für Räume mit musikalischer Nutzung ist und so eine Basis für die Beurteilung der Durchsichtigkeit schafft.

Die Empfindung des Zusammenwirkens von Schallquellen oder Klangkörpern mit ihrer räumlichen Umgebung einschließlich der Einbeziehung des Hörers wird als Raumeindruck bezeichnet (vgl. [Ahnert 1993], Kap. 3.1.1). Dabei kann der Raumeindruck in seine beiden wesentlichen Komponenten Räumlichkeit und Halligkeit aufgeteilt werden. Die Halligkeit wird nach [Ahnert 1993] als die Empfindung, dass außer dem direkten Schall reflektierter Schall vorhanden sei, der nicht als Wiederholung des Signals empfunden werde, definiert. Dabei kann dieser subjektive Eindruck des Nachhallvorganges mittels des sog. Hallmaßes als objektive Größe beschrieben werden, dessen Optimum zwischen 3 dB und 8 dB liegt. Ähnlich wie beim Klarheitsmaß wird hierbei der Nachhallpegel zur frühen, deutlichkeitserhöhenden Energie ins Verhältnis gesetzt (vgl. [Ahnert 1993], Kap. 3.1.2.4).

$$H = 10 \lg \frac{\int_{50\text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (3.1.7.4)$$

Für den Raumeindruck ebenfalls wichtig sind frühe, seitlich einfallende Reflexionen, welche bei musikalischen Veranstaltungen den gewünschten Eindruck der akustischen Weite der Schallquelle vermitteln. Durch Seitenwandreflexionen tragen grundsätzlich alle frühen seitlichen Reflexionen zum subjektiven Eindruck der Räumlichkeit bei. Dabei wird das Verhältnis der seitlichen Energie zwischen 25 ms und 80 ms mit dem der Gesamtenergie, die allseitig einfällt bis 80 ms, gebildet. E_{Bi} bedeutet darin die Schallenergiekomponente, die mittels eines Achter-Mikrofones gemessen wird (vgl. [Möser 2010], Kap. A3.10).

$$LF = \frac{E_{80Bi} - E_{25Bi}}{E_{80}} \quad (3.1.7.5)$$

Mit Hilfe des sog. Seitenschallmaßes, welches sich aus dem Seitenschallgrad (Lateral Energy Fraction) über $10 \lg LF$ definieren lässt, können die von vorn einfallenden Schallanteile ausgeschlossen werden. Danach wird der Seitenschallanteil mit dem Kosinus des Einfallswinkels verrechnet (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.2.4). Übliche Werte für den Seitenschallgrad werden zwischen -1 dB und -5 dB angegeben (vgl. [Möser 2010], Kap. A.3.10).

Ein weiteres Kriterium für die Beurteilung des Raumeindrucks, welches sowohl die Halligkeit, die Diffusität und die frühen seitlichen Reflexionen einbezieht, ist das sog. Raumeindrucksmaß. Dieses kann messtechnisch mittels eines Richtmikrofones bestimmt werden, dessen Richtcharakteristik die einfallende Schallenergie von vorn aus einem Raumöffnungswinkel von 80° erfasst. Die dabei gemessene Energie $W_{25...80\text{ms}}^{\text{vorn}}$ wird mit frühen und späten Energiewerten ins Verhältnis gesetzt. [Fasold 2003]

empfiehlt für einen optimalen Raumeindruck für Musikveranstaltungen Werte zwischen +1 dB und +7 dB.

$$R = 10 \lg \frac{W_{25ms..80ms} - W_{25ms..80ms\ vorn}}{W_{0..25ms} + W_{25ms..80ms\ vorn}} \quad (3.1.7.6)$$

Zur subjektiven Bewertung von raumakustischen Verhältnissen bei Musik ist die Lautheit ein wichtiger Faktor, welche in direktem Zusammenhang mit dem Gesamturteil über die akustische Güte steht (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 5.2.11). Das ebenfalls aus der Impulsantwort abgeleitete Stärkemaß G beschreibt den Anteil des Raums an dem durch eine Schallquelle am Hörerplatz hervorgerufene Schallpegel. Dabei wird die an einem Hörerplatz gemessene Schallenergie in Bezug zu der Schallenergie, den die gleiche Quelle im Freifeld in 10 m Entfernung erzeugt, gesetzt (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.2.4). Eine positive Bewertung des Stärkemaßes G liegt zwischen 0 und 10 dB.

$$G = 10 \lg \frac{W_{ges}}{W_{ges10m}} \quad (3.1.7.7)$$

Innerhalb der Anfangsreflexionen ist neben der Dursichtigkeit auch die Abschätzung der Deutlichkeit, bzw. der Sprachverständlichkeit, wichtig. Um die Silbenverständlichkeit zu gewährleisten, sollte die beim Hörerort eintreffende Schallenergie bis etwa 50 ms nach dem Direktschall ankommen (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.2.4).

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_0^{50\ ms} p^2(t) dt}{\int_{50\ ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.1.7.8)$$

Als sehr gute Silbenverständlichkeit werden Werte für das Deutlichkeitsmaß von $C_{50} > 0$ dB erforderlich. In Räumen mit einer höheren Nachhallzeit werden Werte von -5 dB als gut angesehen. Ebenfalls wird hier die Balance zwischen früh und spät eintreffender Schallenergie beschrieben, die sich aus der Impulsantwort ableiten lässt und eine von der Nachhallzeit unabhängige Kenngröße darstellt (vgl. [Nocke 2014], Kap. 4.3).

In diesem Zusammenhang bildet die sog. Schwerpunktzeit t_s ein Gütekriterium zur Wertung des Raumeindrucks und der Dursichtigkeit von Musik- und Sprachdarbietungen. Sie kennzeichnet die Zeit des Energiemaximums und liegt zur Beurteilung der Dursichtigkeit von Musik bei Werten zwischen 100 ms und 150 ms, bei Sprache unterhalb von 80ms (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 5.2.7).

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.1.7.9)$$

Ein für die Sprachverständlichkeit, auch im Hinblick auf Sprachalarmierungsanlagen, ebenfalls mögliches Bewertungskriterium ist der Sprachübertragungsindex (Speech Transmission Index) STI oder dessen Vereinfachung (Rapid Speech Transmission Index) RASTI. Hierbei werden über einen Lautsprecher entsprechende sprachähnliche Signale gesendet und diese mittels des STI- oder RASTI-Verfahrens auf direktem Wege am Zuhörerplatz gemessen und ausgewertet. Dieses Verfahren beruht auf frequenzgewichteten arithmetischen Mittelwerten. Hierbei wird der Signal-Geräuschabstand innerhalb bestimmter Frequenzbänder ermittelt und dessen Beitrag, den die Frequenzbänder zur Sprachverständlichkeit leisten, gewichtet und arithmetisch über den Frequenzbereich der Sprache gemittelt (vgl. [Lazarus 2007], Kap. 7.3.1). Um die STI-Werte zu bestimmen, wird die Verringerung der Signalmodulation zwischen Schallquelle und dem Empfangsplatz bei Oktavmittelfrequenzen von 125 Hz bis 8000 Hz gemessen. Beim schnelleren RASTI-Verfahren werden dagegen nur zwei Modulationsfrequenzen (500 Hz und 2000 Hz) verwendet, die charakteristisch für die Sprachverständlichkeit sind (vgl. [Möser 2010], Kap. A.3.4). Für die subjektive Beurteilung der STI-Werte werden für ein gutes Silbenverständlichkeitsurteil Werte zwischen 0,6 bis 0,75 angegeben und für eine ausgezeichnete Sprachverständlichkeit 0,75-1,0.

Ergänzend zu den Sprachverständlichkeitskriterien kann mittels des Artikulationsverlustes von Konsonanten (Articulation Loss of Consonants) das Verhältnis des Hörerabstandes zum Hallradius erfasst werden. Mit Hilfe der Gleichungen (3.1.1.4), (3.1.7.1) und der Entfernung zwischen Schallquelle und Hörer s kann dieser Artikulationsverlust wie folgt berechnet werden:

$$Al_{cons} \approx 0,652 \left(\frac{s}{r_H} \right)^2 T \quad (3.1.7.10)$$

Für eine gute und eine angemessene Verständlichkeit sind laut [Möser 2010] prozentuale Werte des $Al_{cons} \leq 11\%$ erstrebenswert. Speziell bei sehr großen Hörerentfernungen sollten die Werte für Al_{cons} betrachtet werden, da die Werte einen genügend großen Störpegelabstand von ca. 30 dB voraussetzen. Bei Abnahme des Störpegelabstandes verschlechtern sich diese (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.2.4). Ebenso können zu lange Nachhallzeiten zu einer Erhöhung des Artikulationsverlustes führen, da bei entsprechender Länge der Nachhall die nachfolgenden Nutzsignale überlagert und somit störend wirkt (vgl. [Möser 2010], Kap. A.3.3).

Wie ersichtlich gibt es für die raumakustische Bewertung eines Raumes im Hinblick auf dessen Nutzungsarten eine Vielzahl von Gütekriterien, die sich mittels messbarer Untersuchung beschreiben lassen. Letztlich spielen die subjektive Wahrnehmung des

Zuhörers und die Darbietungsweise des Vorgetragenen, ob musikalisch oder sprachlich, eine ebenso entscheidende Rolle.

3.1.8 Klangeigenarten der Tasteninstrumente

Der Musiksaal des Deutschen Museums wird neben der alltäglichen zur Schaustellung von historischen Musikinstrumenten auch diese für Konzerte innerhalb des Raumes bereitstellen. Da es sich bei den zu bespielenden Exponaten vorwiegend um Tasteninstrumente handelt (siehe Anlagen Teil 1: Fotodokumentation. Abbildung 20), soll das folgende Kapitel über die Klangeigenarten und Richtcharakteristiken dieser informieren, um die Wechselwirkung des Instrumentenklanges mit den Primär- und Sekundärstrukturen abschätzen zu können.

Die Richtcharakteristik eines Konzertflügels wird vor allem über die Schwingungsmoden des Resonanzbodens gekennzeichnet (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 4.3.1.7). Hierbei entsteht eine gewisse Richtungsunabhängigkeit die den Schall erstens nach oben direkt und über Reflexionen am Deckel wirksam werden lassen und zweitens sich dieser über Fußbodenreflexionen im Saal ausbreitet. Da es sich bei der Richtcharakteristik um eine frequenzabhängige Größe handelt, wird im Folgenden die Klaviatur in tiefe, mittlere und hohe Lagen unterschieden. Der Deckel und das ganze Instrument haben für gewisse Richtungen des direkten oder des reflektierten Schalles eine abschattende Wirkung. Je höher die Frequenzlage ist, desto größer wird der Einfluss des halbgeöffneten oder geöffneten Deckels des Instrumentes (vgl. [Meyer 2015], Kap. 4.5.1). In den tieferen Lagen, die sich um den Grundton C, entsprechend einer Frequenz von ca. 63 Hz, ansiedeln, verliert das Hindernis des Instrumentes aufgrund von Beugungseffekten an Bedeutung. Dabei erfährt die Schallabstrahlung, geschuldet der Tatsache, dass der Resonanzboden wie ein Dipol wirkt, einen nach oben und unten gerichteten gegenphasigen Schalldruck (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 4.3.1.7). In der Horizontalebene werden deshalb die tiefen Frequenzen deutlich abgeschwächt. In den Frequenzlagen um 250 Hz findet hinter dem Instrument eine Pegelzunahme von 5 dB als vor ihm statt. Dies resultiert aus dem Entfallen der Interferenz zwischen den gegenphasig nach oben und unten abgestrahlten Schallanteilen, die durch Abschattungseffekte des Deckels begründet sind (vgl. [Meyer 2015], Kap. 4.5.1).

Im Bereich der mittleren Lage der Klaviatur dominiert ebenfalls die Dipolcharakteristik des Resonanzbodens, jedoch zeigt sich für höhere Frequenzen, ab ca. 500 Hz aufwärts, eine leichte Schallkonzentration aus dem Deckel heraus. Dennoch ist die Abstrahlwirkung zur Rückseite des Instrumentes relativ stark. Eine beinahe gleichmäßige Abstrahlung der Mittellage verdeutlicht sich in der Horizontalebene des Flügels. Cha-

rakteristisch ist die Abschattung und Schallkonzentration durch den Deckel in den hohen Tonlagen. Es kommt zu einer ausgeprägten Bündelung zwischen 15° und 35° in der Vertikalebene, die der Richtung des schräggestellten Deckels entspricht (vgl. [Meyer 2015], Kap. 4.5.1). Die Einflussnahme des geöffneten Deckels wird im Polar-
diagramm in Abbildung 6 noch einmal verdeutlicht.

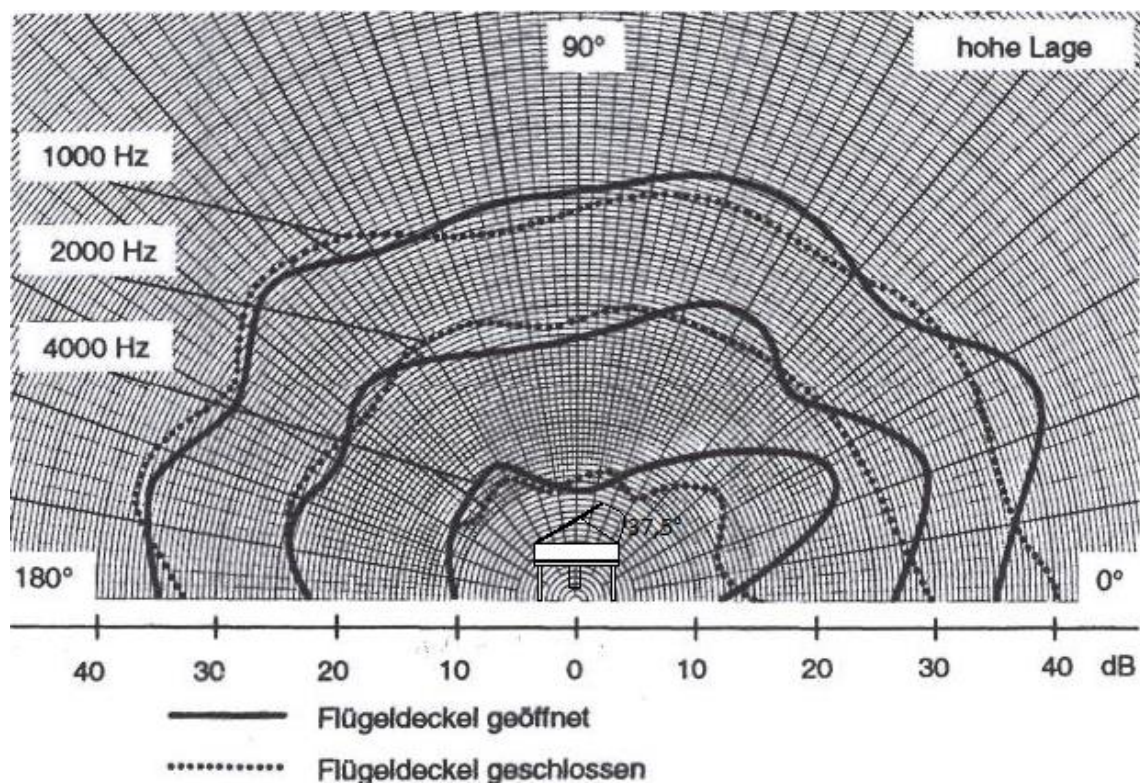


Abbildung 6: Richtcharakteristik eines Flügels in der Vertikalebene bei geöffneten und geschlossenen Deckel in den hohen Lagen [Meyer 2015]

Wie zu erwarten ergeben sich bei geschlossenem Deckel markante Unterschiede in der Richtcharakteristik des Instrumentes. Wie Abbildung 6 zeigt kommt es zu einer gleichmäßigen Verteilung der Amplituden, was sich auch im Wegfallen der starken Schallkonzentration der rechten Seite widerspiegelt. Rekapitulierend sind die Richtcharakteristiken des Flügels abhängig von der zu bespielenden Lage und der Stellung des Flügeldeckels. Dennoch werden die Klangspektren maßgeblich durch die Schallabstrahlungseigenschaften des Resonanzbodens in den Bereichen der stärksten Resonanzen zwischen 200 Hz und 1000 Hz definiert (vgl. [Meyer 2015], Kap. 3.4.1).

Ähnlich wie beim Flügel verhält sich die Schallabstrahlung beim Cembalo. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Zargen und der Deckel um ein vielfaches leichter, weniger steif und daraus resultierend schwingungsfähiger sind. Im Bereich der tiefen Frequenzen macht sich dies deshalb bei der Schallabstrahlung bemerkbar. Nach [Meyer

2015] sind typische Frequenzlagen für eine Deckelresonanz, hierbei ist die Schwingungsamplitude des Deckels genau so groß wie die des Resonanzbodens, bei 120 Hz zu erwarten. Die Richtcharakteristik des Cembalos ist im Bereich bis 100 Hz noch relativ rund, wobei es ab 100 Hz bis 150 Hz zu einer Ausprägung als Dipol kommt. Hierbei entsteht eine leichte Rechtsverschiebung in Blickrichtung des Musikanten. Zu den höheren Frequenzgebieten verteilt sich die Schallabstrahlung auf alle Richtungen, jedoch der Schallpegel hinter dem Instrument im Vergleich zum geöffneten Deckel abnimmt (vgl. [Meyer 2015], Kap. 4.5.5).

Da die Orgel in ihrer konstruktiven Gestalt noch weitaus komplexer und individueller ist als beispielsweise ein Flügel, kann nur schwer eine genaue allgemeingültige Aussage über die Richtcharakteristik getroffen werden (vgl. [Dickreiter 2008], Kap. 2.3.3.4). Jedoch kann hinsichtlich der Schallabstrahlung zwischen drei akustischen Situationen differenziert werden. Da im Normalfall die größte Anzahl der Pfeifen im Inneren des Instrumentes untergebracht ist, wird dieser Schall nur durch die Öffnungen zwischen den Prospektpfeifen¹ an der Vorderseite der Orgel in den Raum abgestrahlt. Gleichwohl können die sichtbaren Prospektpfeifen den Schall frei in den Raum senden. Da die meisten Prospektpfeifen als Labialpfeifen² gebaut sind, weisen diese eine Dipolcharakteristik auf, die jedoch aufgrund der unterschiedlichen Längen der Pfeifen und der damit einhergehenden Mündungskorrektur keine starke Ausprägung erfährt (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 4.3.1.8). Überdies hinaus kann es je nach Bauart der Orgel sog. Zungenpfeifen geben, die horizontal in den Raum ragen. Diese Labialpfeifen können je nach Länge und Weite des Schalltrichters einen umso schärferen Bündelungsgrad besitzen. Auch Spanische Trompeten genannt, weisen diese eine mit ansteigender Frequenz zunehmende Bündelung in Achsrichtung auf (vgl. [Meyer 2003]).

Aus diesen Erkenntnissen kann erwartet werden, dass die Orgel über Ihre schmalen Schlitz zwischen den Prospektpfeifen sowie über die Öffnungen zwischen den Pfeifenfüßen und über den Pfeifen eine Art unregelmäßiges Interferenzgitter erzeugt, welches eine gleichmäßige Schallabstrahlung über einen breiten Winkel erzeugt (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 4.3.1.8). Letztlich entscheidet die Kopplung der Orgel in ihrer klanglichen Erscheinungsform an die Akustik des sie umgebenden Raumes. Dies ist in der relativ kurzen Ausklingzeit des Instrumentes, in allen Tonlagen circa von 0,1 bis 0,15 s, begründet. Um dem Instrument deshalb an Klangvolumen zu verhelfen, bedarf

¹ Unter Prospektpfeifen versteht man i. All. die sichtbaren Pfeifen einer Orgel, von lat. prospectus = Anblick.

² Labial aus dem lateinischen für Lippe. Die Tonerzeugung beruht auf dem Auftreffen eines Luftstromes durch einen schmalen Spalt auf eine Kante.

es nach einer Überlagerung mit der zeitlichen Strukturierung des Schallfeldes durch den Raum. Somit bildet der Nachhall eines Raumes ein wichtiges Kriterium für ein spürbares Ausklingen der Orgel (vgl. [Meyer 2003]).

Mit der Erkenntnis über die Richtcharakteristiken der Musikinstrumente kann eine Abschätzung über die Wechselwirkung mit den sie umgebenden Oberflächenstrukturen getroffen werden. Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich mit der verwendeten Messmethode der Nachhallzeit und den Computersimulationsverfahren.

3.2 Messung der Nachhallzeit

3.2.1 Grundlagen

Unter Betrachtung der Definition in Kap. 3.1.7 kann die Nachhallzeit durch das Abschalten einer hinreichend lauten Schallquelle gemessen werden. Dabei ist der zu bewertende Raum mit einem kontinuierlichen, breitbandigen Rauschen anzuregen und der Abklingvorgang nach dem Abschalten aufzuzeichnen und zu messen (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.2.5). Die verwendeten Messmethoden basieren auf der Fourier Analyse, welche die spektrale Zerlegung eines Zeitsignals bezüglich seiner harmonischen Frequenzen beschreibt. Die Spektralanalyse stellt dabei Methoden bereit, die das gemessene Signal transformieren im Hinblick darauf, durch eine andere Sichtweise zusätzliche im Signal enthaltene Informationen ablesen zu können (vgl. [Beucher 2015], Kap. 1.2). Mit Hilfe des Frequenzspektrums $\tilde{A}(\omega)$ kann der Anteil verschiedener Frequenzen am Gesamtsignal differenziert werden. Dieses lässt sich mittels des Skalarproduktes des Zeitsignals $a(t)$ und der harmonischen Schwingung ω zu einer definierten Frequenz bestimmen (vgl. [Möser 2010], Kap. 3.2.2.1).

$$\tilde{A}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.2.1.1)$$

Um die computergestützten Messsysteme und die Nutzung von A/D-Wandlern zu ermöglichen, ist die Verwendung zeitdiskreter Signale notwendig. Dabei wird eine digitale Aufnahme vom Originalsignal erstellt, deren zeitliche und spektrale Auflösung durch Abtastung des eintreffenden Zeitsignals in festen Zeitintervallen eingeschränkt wird. Die sog. Abtastrate f_s legt die maximal auflösbare Frequenz f_{\max} , auch Nyquist-Frequenz genannt, fest (vgl. [Möser 2010], Kap. 3.2.2.1).

$$f_{\max} = \frac{1}{2} f_s \quad (3.2.1.2)$$

Mittels der Abtastdauer T kann die Dichte Δf des diskreten Frequenzspektrums berechnet werden:

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (3.2.1.3)$$

Zur praktischen Anwendung bei Messungen wird hierbei mittels eines Referenzsignals die Impulsantwort durch Entfaltung des anliegenden Zeitsignals im Frequenzbereich

generiert. Wird angenommen, dass es sich um ein zeitlich invariantes, lineares (LTI-) System handelt, kann durch Entfaltung der beiden Datensätze das Übertragungsverhalten bestimmt werden. Die hier verwendeten Messverfahren stützen sich auf die Rückwärtsintegration der quadrierten Impulsantwort zur Bestimmung der Abklingkurven bei Anregung des Raumes mittels eines Gleitsinus oder der Knallanregung und sind in der [DIN EN ISO 3382-1], [DIN EN ISO 3382-2] sowie in der [DIN EN ISO 18233] festgelegt. Dadurch, dass unter Verwendung entsprechender Oktav- und Terzbandfiltern gemessen wird, empfiehlt [Fasold 2003] in Räumen für musikalische Darbietungen beginnend bei 63 Hz bis 5000 Hz zu messen. Ebenfalls lässt sich die Nachhallzeit durch die oben beschriebene Methode mit größerer Genauigkeit bestimmen und die Einflussnahme des Störschallpegels auf das Messergebnis reduzieren.

Für die Ausführung der Messung werden Diffusfeldmikrofone, eine Schallquelle mit Kugelcharakteristik und eine computergestützte Messsoftware benötigt. Der dabei erzeugte Schalldruckpegel sollte hinreichend groß sein, um ungünstige Störpegel einflüsse innerhalb der Abklingkurve zu vermeiden. Die Messmikrofone sollten mit genügend Abstand zueinander und zu den Raumbegrenzungsflächen so aufgestellt werden, um eine gleichmäßige Erfassung aller Raumbereiche zu gewährleisten. Je größer das Volumen des Raumes ist, desto mehr Mikrofonpositionen sollten für die Gesamtmittelung gewählt werden. Jede Messposition wird dann mit zwei unterschiedlichen Lautsprecherpositionen gemittelt. Vor Beginn der Messung sind die Messmikrofone mit einem Pegel von 94,0 dB zu kalibrieren. Überdies hinaus sind Temperatur und Luftfeuchtigkeit des Raumes zu messen. Das Ergebnis der Messung kann je nach Funktionsweise der verwendeten Software direkt abgelesen werden oder bedarf einer weiteren Auswertung, in der auch die Publikumsabsorption mit eingerechnet werden kann.

3.2.2 Sweep-Verfahren

Mit der Verwendung des Gleitsinus, auch Sweep oder Chirp³ genannt, in Kombination mit der Entfaltung im Frequenzbereich, lassen sich bei der Bestimmung der Impulsantwort eines Raumes wesentliche Vorteile feststellen. Einerseits ist eine geringe Empfindlichkeit gegenüber zeitlichen Varianzen, wie Temperaturschwankungen und Luftbewegungen, festzustellen und andererseits kann eine Verringerung des effektiven Störpegelabstandes durch den Klirrfaktor ausgeschlossen werden (vgl. [DIN EN ISO 18233], Kap. B.1). Da der Gleitsinus eine stetige Funktion der Frequenz darstellt, können bei der D/A-Wandlung positive Effekte bei der Anti-Aliasing Filterung im Vergleich

³ Unter Chirp (aus dem Englischen für to chirp = zwitschern, zirpen) wird ein Signal in der Signalverarbeitung bezeichnet, dessen Frequenz sich zeitlich verändert.

zu stufenförmigen oder unstetigen Signalen festgestellt werden. Außerdem werden harmonische Verzerrungsanteile bei Störungen im Messweg gut von der Impulsantwort separierbar, was jedoch von der genauen Signalform und –länge abhängt (vgl. [Möser 2010], Kap. 3.2.2.3). Bei den Nachhallzeitmessungen wurde ein exponentieller Sweep oder auch Log-Sweep mit einem rosa Frequenzgang für die Anregung verwendet.

Der Ablauf der Sweep-Messung erfolgt analog zur beschriebenen Ausführung in Kapitel 3.2.1. Dabei wird der Sweep an oder unterhalb der tiefsten Bandkantenfrequenz gestartet und endet mindestens an der obersten Bandkantenfrequenz. Anschließend tritt eine Phase der Stille ein, die zum Anregungssignal zuzuzählen ist. Hierbei ist das Ansprechen auf die Sweepanregung vom Beginn des Gleitsinus bis zu Zeitpunkt der Nachhallerfassung aufzuzeichnen. Bei der Verwendung von sehr langen Sweeps, wie im vorliegenden Fall, ist die Phase der Stille so zu bemessen, dass sie den im Allgemeinen ziemlich kurzen Nachhall bei den höchsten Frequenzen enthält, da die tieferen Frequenzanteile bereits gemessen wurden, während sich das Anregungssignal noch im Aufwärtssweep befindet (vgl. [DIN EN ISO 18233], Kap. B.2).

Abbildung 7 zeigt für die Ermittlung der Impulsantwort des Raumes den erforderlichen Entfaltungsprozess der durch spektrale Division des Antwortspektrums durch das Anregungsspektrums erfolgt. Dabei ist die Transformation zwischen Zeit- und Frequenzbereich mit FFT gekennzeichnet. Durch Transformation zurück in den Zeitbereich wird die Breitbandimpulsantwort geliefert, die anschließend in die Impulsantwort verarbeitet wird.

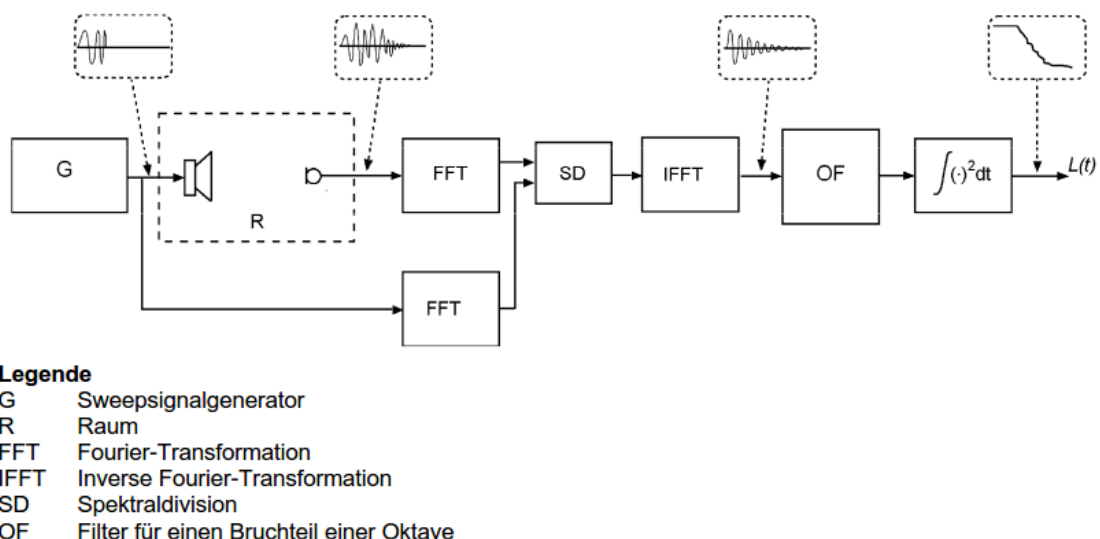


Abbildung 7: Verarbeitung der Messdaten mittels Sweep-Anregung [DIN EN ISO 18233]

3.3 Computersimulation

3.3.1 Grundlagen

Mit Hilfe von rechentechnischen Simulationsverfahren können bereits in der Frühphase der Planung von Räumen Schallausbreitungsvorgänge und raumakustische Eigenschaften derselben gezielt simuliert und berechnet werden. Dabei wird auf Basis der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Theorie die geometrische Ausbreitung der Schallenergie auf geradlinige Schallstrahlen reduziert. Da die Kapazität des Rechenaufwandes zu enorm wäre, kann die Wellennatur des Schalls mit ihren Beugungseffekten nicht erfasst werden. Dies begrenzt die Einsatzmöglichkeiten beispielsweise der Optimierung von Oberflächenstrukturen.

Für die Ermittlung der Raumimpulsantwort stehen prinzipiell zwei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Beim Spiegelquellenverfahren werden geometrisch gerichtete Reflexionen anhand von Spiegelquellen dargestellt, die hinsichtlich der Intensität, Zeit und Einfallsrichtung ausgewertet werden können. Dies ermöglicht durch das Erhöhen der Spiegelquellen für einzelne Hörerplätze eine detailliertere Darstellung der Raumimpulsantwort. Wird nun die Oberflächenbeschaffenheit der Raumstruktur mit diversen Schallabsorptionsgraden versehen, können die Reflexionsvorgänge in ihrer Intensität beeinflusst werden (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.3.6). Folglich entsteht innerhalb des modellierten Raumes eine simulierte Nachhallzeit, die über die verwendeten Strukturen und Wandelemente definiert wird. Jedoch sind für genaue Aussagen über die Raumimpulsantwort extrem hohe Rechenkapazitäten von Nöten, da die Zahl der Spiegelquellen mit der Anzahl der eingebrachten Strukturen eine immer höhere Ordnung erfährt. Entgegenwirkend werden Spiegelschallquellenverfahren vorzeitig abgebrochen und mit der berechneten Nachhallzeit zusammengefügt um die Raumimpulsantwort zu erhalten.

Mittels Ray Tracing, einem Strahlenverfolgungsmodell, werden Schallstrahlen als Ausschnitt einer Kugelwelle ausgehend von der Schallquelle simuliert. Somit gilt für die Ausbreitung dieser Ausschnitte, dass sich mit Entfernung von der Schallquelle der Querschnitt vergrößert. Beim Auftreffen oder Streifen eines solchen Querschnittes auf einen Zuhörerbereich kann diese der Laufzeit des Strahls entsprechende Energie zugeordnet werden (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.3.6).

Eine fortgeschrittene akustische Untersuchungsmethode bildet das sogenannte Schallteilchensimulationsverfahren. Ausgehend von der Schallquelle wird eine enorm große Anzahl von Teilchen als Energieträger versendet. Die Ausbreitung erfolgt in der Regel

ebenfalls Kugelförmig, sodass möglichst alle Raumrichtungen gleichmäßig erfasst werden. Dabei breiten sich die Schallteilchen geradlinig in Strahlen aus. An den Raumbegrenzungsflächen kann nun das Reflexions- und Absorptionsverhalten nach Belieben eingestellt werden. Ebenso lassen sich für einzelne Teilgebiete im Raum Reflexkogramme bezüglich raumakustischer Kriterien aus diesem Verfahren erstellen, das wiederum ermöglicht, die akustische Qualität von diversen Sitzplätzen in einem Raum zu visualisieren.

Die sogenannte Auralisation bezeichnet ein rechentechnisches Verfahren für die Beurteilung von akustischen Verhältnissen an einem definierten Ort, welches die kopfbezogene Außenohrübertragungsfunktion bis zum Trommelfell einbezieht. Dieser Vorgang überträgt akustische und elektroakustische Daten in ein Audiosignal, das dem Anwender ermöglicht sich virtuell in den Raum zu begeben. Dabei wird der objektive Bewertungsprozess um das subjektive Empfinden erweitert. (vgl. [EASE 2009]). Damit bietet die Auralisation eine Möglichkeit in den Raum hineinzuhören und auf diese Weise den zu erwartenden Klangeindruck vorab zu beurteilen (vgl. [Fasold 2003], Kap. 4.3.3.6).

3.3.2 EASE

Die Software EASE 4.4 (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) bietet ein umfangreiches Portfolio für raumakustische Simulationen und Untersuchungen. Dabei wird die Software in eine Anzahl von miteinander verbundenen separaten Programmen und Programmmodulen unterteilt, die unterschiedliche Funktionen bieten. Das Grundmodul fungiert als intuitive Benutzeroberfläche für die Erstellung eines Projektes und der Modellierung eines Raumes anhand eines kartesischen Koordinatensystems. Dem Benutzer werden hierfür eine Reihe von Vereinfachungen und Optionen zur Gestaltung des Raumes angeboten, wie beispielsweise die Möglichkeit einen symmetrischen Raum durch Spiegelung der Koordinaten an einer ausgewählten Achse einzurichten. Dies spart bei komplexen Räumen an Zeit. Ebenfalls können Raummodelle aus anderen CAD-Programmen wie Autodesk, AutoCAD und anderen DXF-kompatiblen Werkzeugen importiert werden. Ist der Raum erstellt, können den definierten Flächen und Objekten im nächsten Schritt Absorptionskennwerte, die entweder aus der Datenbank von EASE stammen oder durch manuelle Eintragung erfolgen, zugewiesen werden. Anschließend kann bereits eine erste Beurteilung bezüglich der Nachhallzeit abgerufen werden.

Durch das Einfügen von Zuhörerflächen und Lautsprecherpositionen können mittels der Area Mapping Funktion und dem AURA Simulationsverfahren unterschiedliche raumakustische Untersuchungen angestellt werden. Hierbei ist jedoch auf die tatsäch-

liche Ausgangsleistung der Schallquelle für die vorgesehene Nutzung zu achten, um irreführende Ergebnisse bei der Berechnung zu vermeiden. Die in Kapitel 3.1.7 beschriebenen raumakustischen Gütekriterien berechnet EASE nun in der vom Benutzer festgelegten Zuhörerfläche ausgehend von der Schallquelle. Um dies durchzuführen, bedarf es einiger Voreinstellungen im Programm. Mittels der Einstellung Split Time [ms] kann festgelegt werden, welche Reflexionen während der Berechnung der Parameter als Direktschall und welche als Raumschall zu betrachten sind. Um die Verständlichkeit zu erhöhen, werden frühe Reflexionen benötigt, die innerhalb von 25 bis 40 ms nach dem Direktschall eintreffen. Um einen Mittelweg zwischen 25 bis 40 ms zu gewährleisten, sollte für die Split Time 35 ms angegeben werden (vgl. [EASE 2009]). Die korrekte Einstellung der Noise-Werte [dB], die dem Ruhepegel in einem Raum entsprechen, ist für eine genaue Simulation von großer Bedeutung. Je nach Stärke des Nutzschallpegels sollte darauf geachtet werden, dass die Noise-Werte möglichst 30 dB unterhalb des Nutzschallpegels liegen. Mit der Map With Shadow Funktion werden Abschattungseffekte von Flächen und simulierten Gegenständen in die Simulation mit einbezogen, was einerseits einen größeren Rechenaufwand nach sich zieht andererseits jedoch die Simulation näher an die Realität heranbringt. Überdies hinaus wird mit dem Parameter Interference festgelegt, in welcher Weise die Energiepegel zu berechnen sind. Durch Aktivierung von Interference Sum werden alle Quellenbeiträge zuerst komplex addiert und die entstehende komplexe Summe dann quadriert. Ohne Aktivierung von Interference Sum findet lediglich eine einfache Energiesummierung des Direktschalls statt und es gehen in diesem Prozess alle Phaseninformationen verloren. Letztlich ist noch der Parameter für die Einstellung der zu verwendenden Frequenzbänder zu beachten. Wird die Schaltfläche Third Octave betätigt, verwendet das Programm Bänder von 1/3 Oktave Breite. Mit der Option Sinus Only kann die Simulation bei einer einzigen Sinusfrequenz durchgeführt werden. Wurden die Voreinstellung vorgenommen, können die verschiedenen Parameter mittels Betrachtung der verfügbaren Bildschirmdarstellungen gezeigt und im sogenannten Mapping Diagramm untersucht werden. Mit AURA werden zwei Simulationsverfahren zur Verfügung gestellt, AURA Mapping und AURA Response. Dabei bildet AURA Mapping die akustischen Maße nach DIN EN ISO 3382 auf den definierten Hörerflächen oder an individuellen Hörerplätzen durch Erzeugung eines Echograms ab. AURA Response berechnet dagegen ein Reflektogramm, aus dem wiederum eine binaurale Impulsantwort für die Auralisation ermittelt werden kann, welche im Folgenden näher erklärt wird.

Für fortgeschrittene akustische Untersuchungen bietet EASE 4.4 mit der Option Ray Tracing die Möglichkeit zur Untersuchung der Reflexionswege zwischen Schallquellen und ausgewählten Punkten im Raum mit den in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Ray Tracing- oder auch Mirror-Image-Techniken. Dabei ist die sogenannte Ray-Tracing-

Routine des Programmes zu beachten, welche einer spezifischen Simulationsroutine unterliegt. Mittels Ray Tracing werden ausschließlich Reflexionsmuster innerhalb des Raums untersucht und damit sind keine punktuellen Reflexionsuntersuchungen möglich. Verhältnismäßig wenige Strahlenverfolgungen sind für die Reflexionsmusteruntersuchungen von Nöten, dass wiederum der Rechengeschwindigkeit zugutekommt. Mit der Option Find Impacts werden Strahlen registriert, die eine Zählkugel mit einem Radius von einem Meter an einem gewählten Punkt simuliert und einer Mirror-Image-Routine zur Identifizierung der in der Mitte des Zählballons ankommenden Strahlen unterzieht. Dabei werden eine größere Anzahl von Strahlen und eine höhere Reflexionsanordnung als beim Ray Tracing nötig. Hier werden zur Erkennung einer genügend großen Anzahl von Treffern die Wahrscheinlichkeitsgesetze herangezogen. Nach Berechnung der Ray-Tracing-Impact Funktion können die Ergebnisse anhand eines Reflektogrammes, eines Wasserfalldiagrammes oder einer 3D Richtungsigeldarstellung visuell angezeigt werden. Ebenfalls lässt sich mit Ray Tracing Impact die Impulsantwort berechnen, wofür EASE 4.4 alle 21 der Terzbandreflektogramme mit einer Einheitskugel faltet. Durch Quadratur und Transformation des Impulsantwortsignals kann die Energie-Zeit-Kurve entwickelt und diese auch graphisch ausgegeben werden. Über dies hinaus verfügt Ray Tracing Impact noch über weitere Funktionen die hier im Einzelnen nicht genannt werden sollen.

Als weiteres Feature präsentiert EASE 4.4 die binauralen Auralisationsprogramme EARS und EARS RT, die auf die akustischen Gegebenheiten des Raums in Verbindung mit den Hörcharakteristika des menschlichen Kopfes eingehen. Mit EARS werden binaurale Auralisationssignale erzeugt, die für ein späteres Abspielen oder Abhören gespeichert werden. Es entstehen sehr große Dateien, die in ihrer Länge dadurch begrenzt werden. Dahingegen kann EARS RT diese Signale mit Hilfe von LAKE-Faltungsfilter-Software in einer kontinuierlichen Form erzeugen, was letztlich einer Darbietung in Echtzeit entspricht und somit keine Längenbeschränkungen nötig werden.

EASE 4.4 zeigt sich in seiner Komplexität als ein umfangreiches Raumakustiksimulationsprogramm, mit dem bereits im Vorfeld der Planung eines Raumes dessen akustische Verhältnisse mittels Simulation abgeschätzt werden können. Des Weiteren verfügt das Programm über nützliche Zusatz- und Unterprogramme, die eine detaillierte Raumplanung unterstützen können.

4 Ergebnisteil

Mit der Aufarbeitung der Theoretischen Grundlagen wird im Nachfolgenden die Vorgehensweise bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung im Detail ausgeführt.

Nach einer Beschreibung des Musiksaales des Deutschen Museum anhand der Planunterlagen und der Fotodokumentation erfolgt eine Zusammenfassung über die Bestandsmessungen. Die Informationen über die akustischen Eigenschaften der Rabitzdecke, des Parkettbodens und der Instrumente werden anhand einer Bestandsanalyse gewonnen und mittels der Messergebnisse plausibilisiert. Anschließend wird ein Simulationsmodell mit der Software EASE auf Basis der Planunterlagen erstellt und der akustische Ausgangszustand abgebildet. Mit Hilfe der Ergebnisse aus der Bestandsanalyse und einer Implementierung derselben in die Computersimulation werden die Vorgaben für die Sanierung definiert. Darauf aufbauend werden verschiedene Trockenbauvarianten untersucht, die sich mit den verwendeten Materialien in der Simulation an die akustischen Verhältnisse vor der Sanierung annähern sollen. Abschließend werden die Ergebnisse aufbereitet und in einer Diskussion bewertet.

4.1 Beschreibung des Musiksaales

Die musikalischen Sammlungen des Deutschen Museums in München bilden eine ganzheitliche Ausstellung über das Instrumentarium der Menschheit von historischen Instrumenten bis zu neuzeitigen Klangkörpern.

Innerhalb dieser Sammlungen dominiert der große Musiksaal, der in einem Tonnengewölbe mit einer abgehängten, stuckverzierten Rabitzdecke⁴, untergebracht ist. Dabei werden im Zuge der Sanierung der Musiksaal und dessen Sekundärstruktur erneuert. Es erfolgt unter anderem ein Rückbau der Rabitzdecke mit der Freilegung des dahinter befindlichen Hohlraumes der an einer tragenden Deckenkonstruktion aus Beton endet (siehe Anlagen Teil 1: Fotodokumentation. Abbildung 32). Dieser für Konzerte mit historischen Instrumenten genutzte Raum beinhaltet zudem verschiedenste Tasten- und Orgelinstrumente, die für die tägliche Ausstellung zur Betrachtung durch die Besucher des Deutschen Museums dienen (siehe Anlagen Teil 1: Fotodokumentation. Abbildung 20). Diese Ausstellung wird ebenfalls neu gestaltet. Hierbei sollen weniger Instrumente als bisher gezeigt und diese teilweise auf Podeste gestellt werden. Es erfolgt auch eine

⁴ Rabitz ist die Bezeichnung für Drahtputz, der aus einer tragenden Unterkonstruktion aus Metall, dem Rabitzgitter als Putzträger und dem Putzmörtel besteht. Benannt nach dem Berliner Maurermeister Carl Rabitz, der dieses Verfahren entwickelte und 1878 zum Patent anmeldete.

bauliche Änderung durch Einsatz einer Innendämmung an der Außenwand und eine Erneuerung des Parkettbodens. Eine genaue Beschreibung des vorliegenden Konstruktes ist für die weitere Untersuchung der raumakustischen Eigenschaften und der Erfassung der Bestandssituation dienlich.

Abbildung 21 zeigt den Musiksaal im Bestand vor der Sanierung. Die Primärstruktur des Raumes ist vor allem durch die Rundbogendecke in Rabetzausführung gekennzeichnet. Die Wände des Raumes sind in Massivbauweise mit einem Glattputz ohne dahinterliegende Hohlräume ausgeführt. Die Fassade ist mit vier Fensternischen versehen, deren Aufbau und Konstruktion auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls besteht. Auf beiden Seiten sind Holzvertäfelungen mit Lüftungsschnitten für die dahinterliegenden Heizkörper angebracht. Des Weiteren ist der Saal an seiner Südwestseite von zwei kleinen Räumen unterbrochen, die jedoch an das Luftvolumen anschließen. Zwischen diesen beiden Räumen erstreckt sich eine Galerie auf 3,5m Höhe, auf der ebenfalls Instrumente zur Schau gestellt sind. Die Brüstung der Galerie ist in einer Holzbauweise ausgeführt. Ein hohlliegender Parkettboden wurde im gesamten Bereich des Fußbodens verlegt und wird nur durch Teppichläufer, die den Ausstellungsweg des Besuchers markieren, unterbrochen.

Das Erscheinungsbild des Musiksaales ist vorwiegend durch die darin befindlichen Exponate geprägt. Dabei handelt es sich um zwei große Orgeln und eine Vielzahl von historischen Tasteninstrumenten, wie Spinette, Flügel und Cembali. Diese Instrumente sind grundsätzlich in Holzbauweise ausgeführt und tragen als Hohl- und Resonanzkörper in gewisser Weise zum raumakustischen Eindruck mit bei. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass durch eine Nachhallzeitmessung dieser im Raum befindlichen Gegenstände gegenüber einer Messung ohne Exponate eine Abschätzung bezüglich ihrer akustischen Wirkung im Raum treffen lässt. Vereinzelte Gestühle mit Polsterüberzug runden das Gesamtbild ab. Eine genaue Beschreibung soll im Teil Bestandsanalyse erfolgen

Mit Hilfe der Planunterlagen und der Messung vor Ort werden die Raumgeometrien des Musiksaales erfasst und in Tabelle 1 dargestellt. Dabei wurden die Abmessungen insofern gemittelt, um mit der Vereinfachung einen entsprechenden quaderförmigen Raum zu generieren, der den Volumenmaßen der Originalräume entspricht:

Tabelle 1: Geometrische Angaben

Objekt	Länge	Breite	Höhe	Volumen
Musiksaal	mittl. 18,29 m	mittl. 13,5 m	mittl. 6,35 m	1568,17 m ³
Nebenraum 1	3,69 m	3,1 m	3,30 m	37,75 m ³
Nebenraum 2	2,95 m	3,1 m	3,30 m	30,18 m ³

Abbildung 8 zeigt den Grundriss im Bestand mit den beiden an das Volumen anschließenden Nebenräumen die ebenfalls als Ausstellungsfläche dienen. Ebenfalls gut erkennbar sind die Fassadenelemente mit den Fensterinschen.

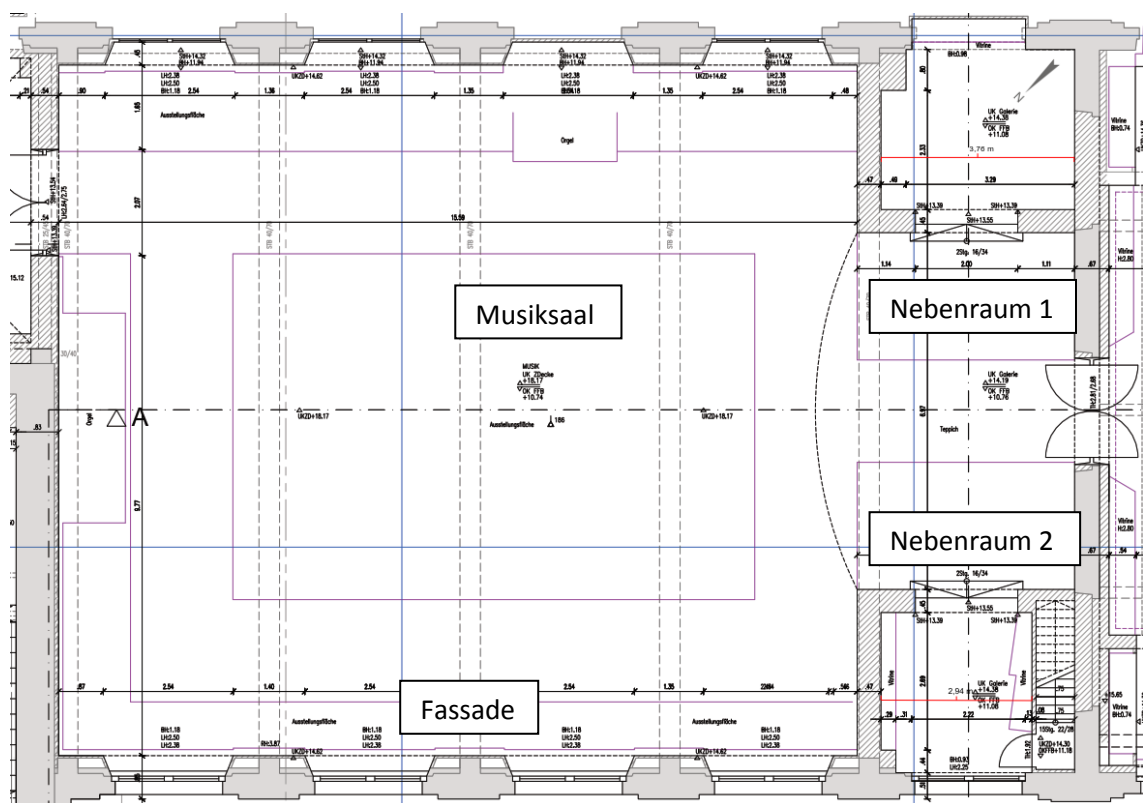


Abbildung 8: Grundriss des Musiksaales im Bestand mit den Nebenräumen 1 & 2

Der Musiksaal verfügt über sieben Fenster im Bestand. Diese haben eine Fläche von 5,17 m² pro Fenster. Vier Fenster pro Fassade und drei Fenster auf der gegenüberliegenden Seite, da die Ahrend-Orgel die Fensterinsche für das sogenannte Windwerk benötigt. Der Nebenraum 2 verfügt ebenfalls über ein Fenster mit einer Fläche von

4,84 m². Die Wandflächen sind vorwiegend mit einem Glattputz überzogen. Abbildung 9 zeigt den Schnitt durch den Musiksaal.

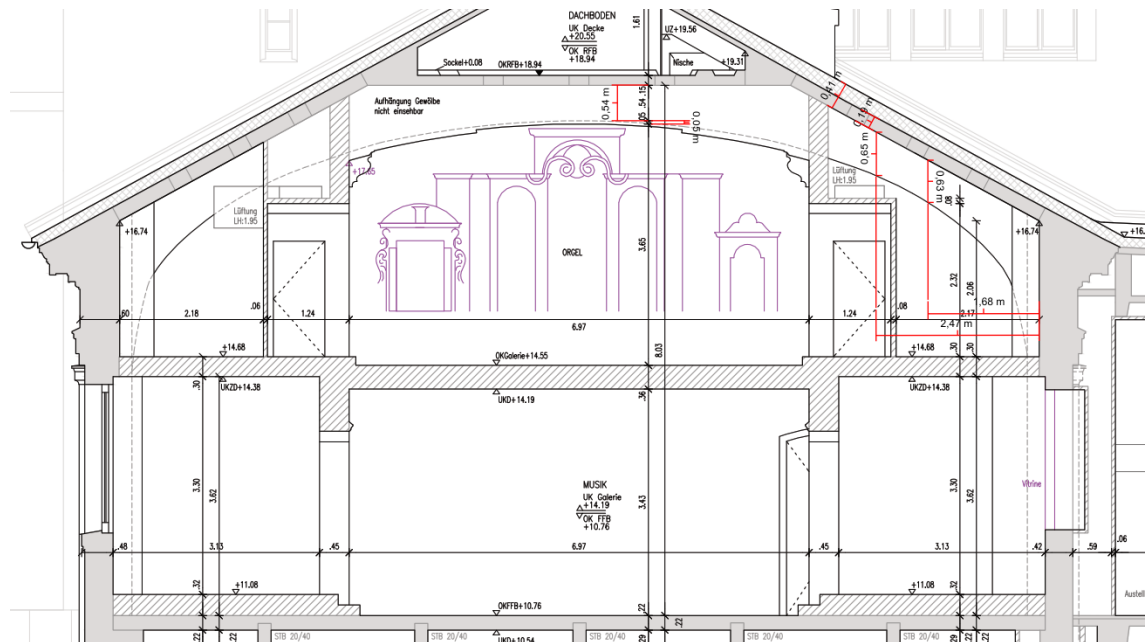


Abbildung 9: Schnitt mit Sicht auf die Südwestseite des Musiksaals

Abschließend kann die Aussage getroffen werden, dass der Saal vorwiegend mit schallharten Oberflächenstrukturen dimensioniert wurde. Der Parkettboden und die zum Großteil aus Holz gebauten Instrumente sind dabei wesentliche Einflussfaktoren für die Akustik im Raum. Auch die Krümmung der Decke spielt für die Diffusität und die Hörsamkeit des Raumes mitunter eine Rolle.

4.2 Messung der Nachhallzeit

Die Messungen der Nachhallzeit wurden bereits im Vorfeld dieser Untersuchung durch Mitarbeiter der Möhler & Partner Ingenieure AG in den Jahren 2015 und 2016 durchgeführt. Sie dokumentierten dabei den akustischen Ist-Zustand durch eine Messung mit den im Saal befindlichen Instrumenten und eine Messung nach Ausräumen der Exponate um die Wirkung dieser messtechnisch festzuhalten. Lediglich die Auswertung dieser Messungen und ein Vergleich beider wurden durch meine Person durchgeführt, um diese für die weitere Analyse, Bewertung und die Computersimulation zu verwenden.

Nachhallzeitmessung mit Exponaten:

Die erste zu untersuchende Messung wurde im voll eingerichteten Musiksaal am 26.10.15 durchgeführt. Dabei dokumentiert die Messung den unbesetzten Zustand, d.h. mit Ausnahme des Messpersonals waren keine Personen im Raum. Das Messsystem bei der vorliegenden Messung bestand aus einem Soundbook Quadro G mit der darauf befindlichen Signalanalyse Software Samurai der Firma SINUS Messtechnik GmbH. Des Weiteren wurden vier Kondensator-Messmikrofone der Firma Mikrotech Gefell GmbH, die aus einem Vorverstärker und einer 1/2" Mikrofonkapsel bestehen, für die Aufnahme der Nachhallzeit verwendet.

Die im Jahr 2015 stattgefundene Messung wurde mittels Knallanregung durch Luftballons nach [DIN EN ISO 3382-1] bzw. [DIN EN ISO 3382-2] nach dem Verfahren der integrierten Impulsantwort für die Nachhallzeit durchgeführt. In [DIN EN ISO 3382-2] sind Angaben zur Messungenauigkeit für verschiedene Messverfahren wie Kurzverfahren, Standardverfahren und Präzisionsverfahren enthalten. Bei der Durchführung der Nachhallzeitmessung im Standardverfahren, wie im vorliegenden Fall zutreffend, liegt die Nenngenauigkeit bei Oktavbändern besser als 5%.

In den Anlagen Teil 2: Messdokumentation sind die Messpositionen, die Werte aus der durchgeführten Messung, der Graph des Abklingvorganges und der Spektrumgraph für die Oktavmittenfrequenzen von 125 Hz bis 4000 Hz aufgeführt. Anhand der gewonnenen Daten sind die Nachhallzeiten für den Musiksaal mit Instrumenten festzuhalten. Tabelle 2 auf der nachfolgenden Seite zeigt die gemessenen Nachhallzeiten T_{20} .

Tabelle 2: Nachhallzeit T_{20} bei den Oktavmittenfrequenzen 125 Hz bis 4000 Hz, Musiksaal mit Instrumenten, Deutsches Museum in München vom 26.10.15

Oktavmittenfrequenz [Hz]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Nachhallzeit T_{20} [s]	1,41	2,09	2,49	2,49	2,34	1,84

Anhand des Messergebnisses wird ersichtlich, dass der Raum im tieffrequenten Bereich bei den Oktavmittenfrequenzen um 125 Hz eine höhere Schallabsorption erfährt als dies in den restlichen Oktavmittenfrequenzen vorkommt.

Nachhallzeitmessung ohne Exponate:

Um eine Aussage über die Wirkungsweise der im Musiksaal befindlichen Instrumente zu treffen, wurde eine weitere Messung der Nachhallzeit am 08.09.2016 nach Ausräumen der Exponate durchgeführt. Anders wie in der vorjährigen Messung wurde diesmal die Signalerzeugung mit Hilfe eines omnidirektionalen Lautsprechers vorgenommen, welcher für das in Kapitel 3.2.2 beschriebene Verfahren zur Anregung mittels Sweep benötigt wird. Dabei wurden sechs Messpositionen mit jeweils zwei Mittelungen pro Position gewählt. Die Anregung des Saals erfolgte über einen Gleitsinus mit einer danach kurz andauernden Periode der Stille. Es wurden dabei die Terzmittelfrequenzen von 50 Hz bis 5000 Hz messtechnisch erfasst.

Anhand des in den Anlagen dokumentierten Messergebnisses können die Oktavmittelfrequenzen über die Mittelung der Terzmittelfrequenzen berechnet werden. Folgende Tabelle zeigt die Nachhallzeit T_{20} für die Oktavmittelfrequenzen 125 Hz bis 4000 Hz gemittelt für den unbesetzten Zustand.

Tabelle 3 Nachhallzeit T_{20} bei den Oktavmittelfrequenzen 125 Hz bis 4000 Hz, Musiksaal ohne Instrumente, Deutsches Museum in München vom 08.09.16

Oktavmittelfrequenz [Hz]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Nachhallzeit T_{20} [s]	2,26	3,09	3,34	3,24	2,91	2,24

Charakteristisch hierbei ist ebenfalls die kürzere Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich. Um diesen Einbruch zu verdeutlichen zeigt die Abbildung 10 die messtechnisch erfassten Terzmittenfrequenzen über die Zeit. Dem Raum wird im Bereich von 100 Hz bis 160 Hz mit einem Schwerpunkt bei 125 Hz deutlich Energie entzogen.

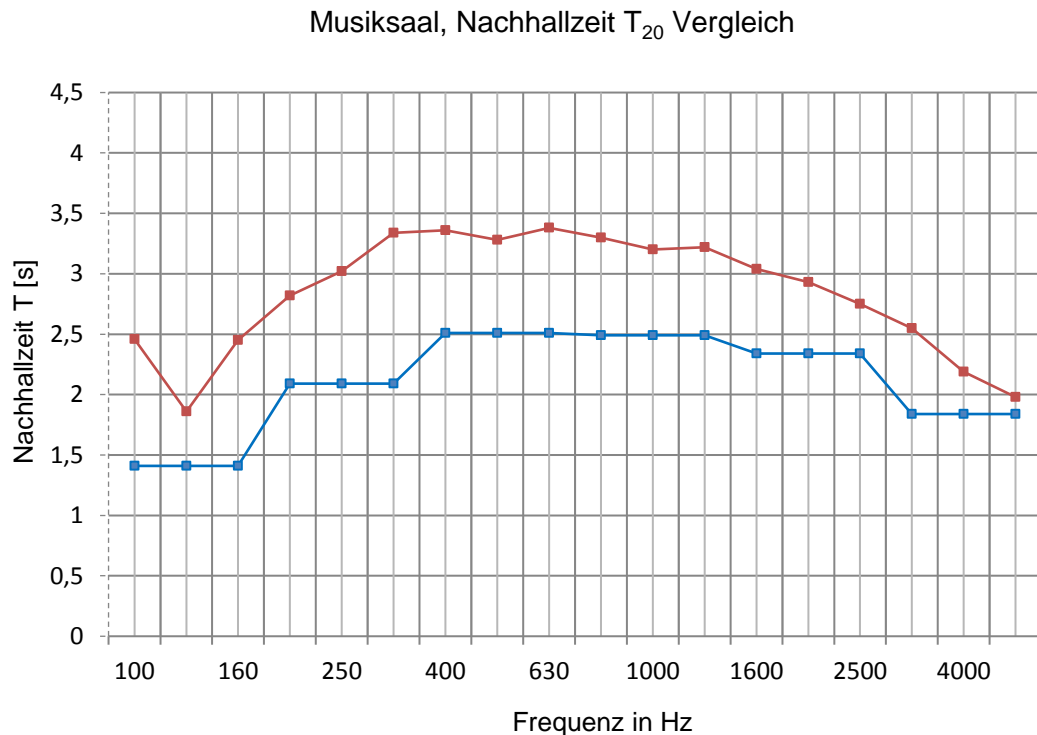


Abbildung 10: Vergleich zwischen Messung mit und ohne Exponate

--- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, mit Instrumenten, Stand Okt. 2015

--- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, ohne Instrumente, Stand Sep. 2016

Aus der Betrachtung der Terzbandmittenfrequenzen lässt sich schließen, dass das Instrumentarium einen nennenswerten Einfluss auf das gesamte Frequenzspektrum nimmt, jedoch kaum zum Einbruch bei 125 Hz beiträgt. Ein Vergleich der beiden Nachhallzeitmessungen in den Terzbandmittenfrequenzen von 100 Hz bis 5000 Hz in Abbildung 10 verdeutlicht den breitbandigen Anstieg der Nachhallzeit durch die Entnahme der Exponate. Die rote Nachhallkurve beschreibt die Messung vom 08.09.2016 und die blaue Nachhallkurve die Messung vom 29.10.2015. Da lediglich die im Musiksaal befindlichen Instrumente entfernt wurden, ist davon auszugehen, dass die tieffrequente Absorption von Teilen der Raumbegrenzungsflächen ausgehen muss. Hierbei sind im Weiteren das Tonnengewölbe und der hohlliegende Parkettboden, welche beide in der

Nachhallzeitmessung vom 08.09.16 noch vorhanden waren, auf deren Schwingungsverhalten und deren damit einhergehenden Absorptionseigenschaften zu untersuchen.

Mit Hilfe der beiden Nachhallzeitmessungen kann bereits eine Aussage über die akustischen Eigenschaften und die Bestandssituation des Musiksaales getroffen werden. Untypisch für musikalische Darbietungen ist ein Abfallen der Nachhallzeit in den tiefen Frequenzbändern. Da jedoch die subjektiv empfundene Akustik des Raumes von den Kuratoren des Deutschen Museums als ideal gekennzeichnet wurde, sollte dies kein Bewertungskriterium darstellen. Überdies hinaus liegen die Mittelwerte der Nachhallzeiten im besetzten und unbesetzten Zustand mit Instrumentarium nach Abbildung 5 auf Seite 21 im Bereich der Mehrzwecknutzung, die der Musiksaal zum einen auch benötigt.

4.3 Bestandsanalyse

Um die akustische Bestandssituation zu erfassen, bedarf es neben der Nachhallzeitmessung und der Beschreibung des Raumes auch einer nachfolgenden Bestandsanalyse der Decke und des Parkettbodens. Hierfür wurden durch die Abrissfirma Stichproben aus der Rabitzdecke und während des Rückbaus entnommen. Der Rückbau des Parkettbodens wurde ebenfalls dokumentiert.

4.3.1 Rabitzdecke im Bestand

Das im Musiksaal befindliche Tonnengewölbe erstreckt sich über die gesamte Breite des Raumes und läuft bis über die Galerie an der Südwestseite hinweg. Dieses ist in einer Rabitzkonstruktion, bestehend aus einer gitterartigen Konstruktion von runden Stahlstangen an die tragende Betondecke angebracht. Wie in Abbildung 32 in der Fotodokumentation erkennbar, wird dieses Grundgerüst der Betondecke von Querstreben, die ebenfalls aus Beton bestehen, unterbrochen. Deutlich erkennbar sind auch die Aufhängepunkte der Abhänger für die Drahtputzkonstruktion, welche in der Massivdecke verankert waren. Auf diese Unterkonstruktion wurde eine spezielle Mischung aus Gipsmörtel aufgetragen. Aus dieser Tatsache besteht die Möglichkeit, dass unterschiedliche Dicken in der Konstruktion der Decke auftreten können. Anschließend konnte dieser Mörtel mit einem feineren Putz versiegelt werden.

Interessierend für die akustische Analyse ist das Schwingungsverhalten der Decke. Die Theorie hierfür wurde bereits in Kapitel 3.1.6 dargelegt. Da im vorangegangenen Kapitel die Nachhallzeit des Raumes einen nicht zu vernachlässigenden Einbruch im Bereich um 125 Hz erfährt, besteht die Überlegung, dass die Konstruktion der Rabitzdecke dem Schallfeld an dieser Stelle durch ihr Schwingungsverhalten Energie entzieht. Aus diesem Grund und für die Erkenntnis des Aufbaus zur Neukonstruktion dieser Decke werden im Folgenden die Stichproben aus der alten Decke auf ihre physikalischen Eigenschaften analysiert, um anschließend auf die Resonanzfrequenz des Systems Rabitzdecke – Betondecke zu schließen.

Mit den physikalischen Eigenschaften sind die Dichte, die Schichtdicke, die flächenbezogenen Massen und der Abstand zur Rohdecke gemeint. Um die Dichte der fünf Proben feststellen zu können, wird jede Probe in drei kleinere Proben unterteilt. Nach Wiegen der einzelnen Proben werden die Volumina mittels eines Messzylinders bestimmt. Mit der Gleichung (3.1.6.1) wird anschließend die Dichte der verkleinerten Proben festgestellt und zu einem Mittelwert zusammengefasst, siehe Tabelle 4 auf der nachfolgenden Seite.

Tabelle 4: Dichte durch Messung der Proben aus der Rabitzdecke

Proben	Volumen in [cm ³]	Masse in [g]	Dichte in [g/cm]
1-1	90	124	1,38
1-2	15	18,5	1,23
1-3	120	194	1,62
2-1	70	74	1,06
2-2	30	35,5	1,18
2-3	60	77,5	1,29
3-1	80	113	1,41
3-2	40	57	1,43
3-3	45	56,5	1,26
4-1	60	77	1,28
4-2	70	91,5	1,31
4-3	100	153	1,53
5-1	60	57,5	0,96
5-2	30	43	1,43
5-3	45	58,5	1,30

Tabelle 5: Mittelwertbildung der Dichten in [kg/m³]

Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
1409,26	1177,38	1364,35	1373,49	1230,56

Anschließend an die Feststellung der Dichten aus den zur Verfügung gestellten Proben kann im weiteren Schritt mit der Gleichung (3.1.6.2) die flächenbezogenen Massen der Decke berechnet werden. Hierfür wird die Kenntnis über die Schichtdicke benötigt, welche aus der Abrissdokumentation der Abrissfirma zu entnehmen ist.

Tabelle 6: Berechnung der Flächenbezogenen Masse in [kg/m²]

Probe Nr.	Dichte in [kg/m³]	Schichtdicke in [mm]	Flächenbezogene Masse in [kg/m²]
1	1409	50	70,3
2	1177	80	89,4
3	1364	60	81,1
4	1374	90	123,6
5	1231	80	98,5

Die dynamischen Federsteifigkeiten setzen sich aus den Tiefen des Hohlraumes zusammen. Nach Ermittlung der Hohlraumtiefen werden aus den physikalischen Eigenschaften im Weiteren die Resonanzfrequenzen, jene Frequenzen bei der die Rabitzdecke mit maximaler Amplitude schwingt, berechnet. Bei dieser Frequenz hat das Schallabsorptionsvermögen der Rabitzdecke ihr Maximum. Ausgehend davon, dass die flächenbezogene Masse der Rohdecke sehr groß gegenüber dem Putzmörtel ist, erfolgt die Berechnung der Resonanzfrequenz mit der Gleichung (3.1.6.3).

Tabelle 7 auf der nachfolgenden Seite zeigt noch einmal die Zusammenfassung der für die Berechnung der Resonanzfrequenz maßgebenden Parameter. Die berechneten Resonanzfrequenzen liegen an den untersuchten Stellen der Decke bei sehr geringen Werten. Dies bedeutet, dass die Rabitzdecke aufgrund der hohen flächenbezogenen Masse nur mit sehr geringer Frequenz schwingt. Die Resonanzfrequenz liegt außerhalb des hörbaren Bereichs und trägt im Bestand nicht zur Absorption tiefer Frequenzen bei.

Die Abbildung 23 bis Abbildung 32 in den Anlagen Teil 1: Fotodokumentation dokumentieren den Abriss und die Analyse der einzelnen Proben.

Tabelle 7: Zusammenfassung der für die Akustik maßgebenden Parameter und die berechneten Resonanzfrequenzen in [Hz]

Probe Nr.	Dichte [kg/m ³]	Schicht- dicke [mm]	Flächenbe- zogene Masse [kg/m ²]	Abstand zur Rohdecke [m]	Resonanz- frequenz [Hz]
1	1409	50	70,3	0,61	9,4
2	1177	80	89,4	0,57	8,7
3	1364	60	81,8	0,57	9,2
4	1373	90	123,6	0,67	7,2
5	1231	80	98,5	0,56	8,6

4.3.2 Parkettboden im Bestand

Bei der Analyse des Parkettbodens im Bestand verhält es sich ähnlich wie in der vorangegangenen Untersuchung. Die gesamte Fußbodenfläche von circa 247 m² ist mit einem auf Lattungen angebrachten Eichenparkett versehen. Dabei wurde bei der Bauteilöffnung (siehe Anlagen Teil 1: Fotodokumentation Abbildung 33) ersichtlich, dass die Lattungen des Fußbodens teilweise auf Kiesschotter aufgelegt wurden. Diese werden von unregelmäßigen Hohlräumen durchzogen. Die Rohdecke, auf welcher der Parkettboden aufliegt ist in Rippenbetonbauweise ausgeführt und hat laut Planunterlagen eine Gesamtdicke von 183 mm. Die Lattung, also die Unterkonstruktion welche den Parkettfußboden trägt weist eine Dicke von 15 mm auf und das Eichenparkett selbst eine Dicke von 22 mm. Daraus resultierend entsteht ein maximaler Luftzwischenraum der Schottung, bzw. der Rohdecke und dem Eichenparkett mit deren Lattung von weniger als 15 mm. Dies hat wiederum zur Folge, dass die dynamische Steifigkeit der Luft als Feder ansteigt. Aus dieser Überlegung und den Informationen aus der Bauteilöffnung kann die dynamische Steifigkeit des Luftvolumens unterhalb des Eichenparketts nach Gleichung (3.1.6.4) näherungsweise berechnet werden. Da die Gleichung für die dynamische Steifigkeit keine Beeinträchtigung bei Veränderungen des Luftvolumens erfährt, wird davon ausgegangen diese für eine Annäherung zur Berechnung der Resonanzfrequenz unter gegebenen Umständen zu verwenden.

Tabelle 8 zeigt die für die Berechnung benötigten Materialkennwerte.

Tabelle 8: Materialkennwerte des Fußbodenaufbaus

Material	Dichte [kg/m³]	Dicke in [mm]	Flächenbezogene Masse in [kg/m²]
Eiche	710	22	15,62
Stahlbeton	2300	183	420,9

Anschließend lässt sich erneut mit Gleichung (3.1.6.3) die Resonanzfrequenz des Systems berechnen:

Tabelle 9: Berechnung der Resonanzfrequenz des Parkettbodens

d_L in [mm]	s'_L in [MN/m²]	m''_1 in [kg/m²]	m''_2 in [kg/m²]	f_0 in [Hz]
15	9,8	15,62	420,9	126,97

Es zeigt sich deutlich, dass die Resonanzfrequenz des Parkettbodens im Bereich um 125 Hz liegt. Mit der angeführten Berechnung lässt sich der Einbruch der Nachhallzeit im Musiksaal des Deutschen Museums erklären. Dem Schallfeld wird an dieser Stelle ein hohes Maß an Energie entzogen und somit trägt der hohl liegende Parkettboden im Bestand zur tieffrequenten Absorption bei.

4.3.3 Instrumente

Wie anhand der Messungen bereit ersichtlich ist, nehmen die Instrumente einen erheblichen Einfluss auf die Hörsamkeit des Raumes. Es tritt eine sehr breitbandige Absorption vor allem in den mittleren und hohen Frequenzlagen auf. Dies ist darin begründet, dass es sich bei den meisten Instrumenten um Cembali und Spinette handelt. Diese historischen Instrumente sind in einer Art Leichtbauweise aus sehr dünnem Holz gebaut worden. Die Resonanzböden und Deckel der Instrumente funktionieren im raumakustischen Sinn daher in gewisser Weise als Plattenschwinger und tragen damit zu einer breitbandigen Absorption bei.

Im Folgenden wird das Modell für die Computersimulation erstellt um die Erkenntnisse über die Bestandssituation zu implementieren. Eine Plausibilisierung der Messergebnisse mit dem Rechenmodell wird dann Aufschluss über die Schallabsorptionsgrade des Bestandes und damit einhergehend die akustischen Eigenschaften der Instrumente geben.

4.3.4 Abbildung der Bestandssituation in EASE

Bei der Erstellung des Modells war es wichtig die Komplexität des Raumes in seiner Gesamtheit zu erfassen. Mit Hilfe der Angaben, die in Kapitel 4.1 beschrieben wurden und dem Ausmessen der genauen Oberflächendimensionen durch die Planunterlagen, werden das Modell des Musiksaals und die angrenzenden Nebenräume erstellt. Dabei wurde der Raum an der X-Achse des Programmes in den ersten Schritten gespiegelt aufgebaut. Da die Nebenräume unterschiedliche Dimensionen aufweisen, mussten diese nach der Spiegelungsmethode einzeln eingefügt werden. Abbildung 11 zeigt den modellierten Raum ohne darin befindliche Objekte. Auf Basis dieses Modells können im Weiteren die unterschiedlichen Situationen eingefügt und simuliert werden.

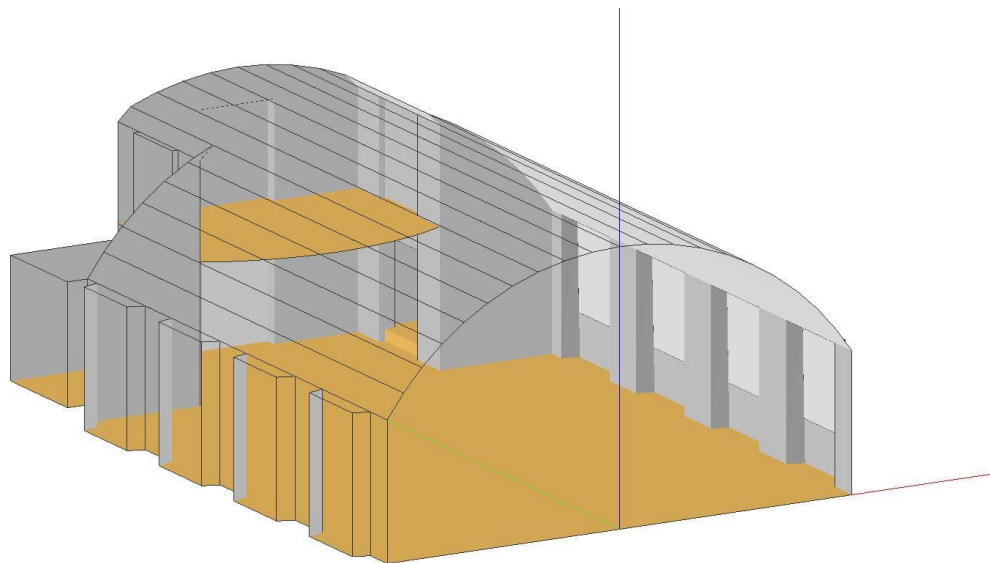


Abbildung 11: EASE Modell des Musiksaals

4.3.5 Plausibilisierung Rechenmodell - Messung

Im nächsten Schritt werden die Mikrofon- und Lautsprecherpositionen aus den Nachhallzeitmessungen als Zuhörerplätze und Lautsprecher in das Simulationsmodell eingefügt. Um die Bestandssituation aus der Messung vom 26.10.2015 nachbilden zu

können, werden anschließend die Objekte wie das Instrumentarium in die Simulation modelliert. Nach Beendigung des Modellierungsprozesses (siehe Anlagen Teil 3: Dokumentation der Simulation Abbildung 42) beginnt das Zuteilen der Schallabsorptionsgrade für die Strukturen im Modell.

Dabei wurde grundlegend darauf geachtet durch Vorgaben aus der [DIN 18041] die Schallabsorptionsgrade für verschiedene Oberflächenstrukturen, siehe Tabelle 10, zu verwenden. Da die Rabitzdecke im Bestand unwesentlich zur Schallabsorption beiträgt, wird angenommen, dass der Schallabsorptionsgrad der Decke denen einer Massivwand ähnelt. Die Anpassung des Parkettbodens, der in seiner Bauweise im Bestand erheblichen Einfluss auf die Nachhallzeit nimmt, geschieht ebenfalls in Annäherung an die Schallabsorptionsgrade für einen hohlliegenden Parkettboden aus der [DIN 18041]. Da die Ausstellungsflächen von einem Teppich umlaufen werden, wird für dessen Schallabsorptionsgrad eine Kombination aus hohlliegenden Parkettboden und 6mm Teppich angenommen. Letztlich wurden die Werte für die Bestandssituation plausibilisiert.

Tabelle 10: Angaben zu Schallabsorptionsgraden α in den Oktavmittelfrequenzen von 125 Hz bis 4000 Hz, gemäß Berechnungsergebnis aus der Untersuchung und Angaben zu Planungswerten gemäß normativen Vorgaben aus [DIN 18041]

Material:	α 125 Hz	α 250 Hz	α 500 Hz	α 1000 Hz	α 2000 Hz	α 4000 Hz
Bestand:						
Rabitzdecke im Bestand	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04
Parkettfußboden Bestand	0,25	0,15	0,13	0,06	0,04	0,06
Teppichboden auf Parkettboden im Bestand	0,25	0,15	0,13	0,19	0,29	0,24
Massivwände im Bestand mit Kalkzementputz	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,03
Instrumente	0,33	0,21	0,16	0,16	0,15	0,17

Ist diese Situation hergestellt, kann durch Anpassung der Schallabsorptionsgrade der Instrumente die Nachhallzeitmessung vom 26.10.2015 mit sehr geringen Abweichungen von maximal 0,06 Sekunden nachgebildet werden.

Anschließend kann durch Entnahme der Instrumente die Nachhallzeitmessung vom 08.09.2016 reproduziert werden. Dabei war jedoch zu beachten, dass die Abweichung der Simulationsergebnisse zu den Originalwerten zu einer unrealistischen Nachbildung führte. Um die Simulation an den Ausgangszustand weiter anzupassen, können in EASE die Berechnungsparameter durch Anpassung der Berechnungslänge und der Anpassung des Diffusitätsfaktors, in EASE mit der Funktion scattering realisiert, beeinflusst werden. Hierbei kann in prozentualen Schritten ein nomineller Diffusionsbetrag als Faktor in die Simulation eingebracht werden, wenn die Diffusionskennwerte der Oberflächenstrukturen, wie im vorliegenden Fall, unbekannt sind. Mit Hilfe einer langen Berechnung und 10% scattering können die Abweichungen für die Reproduktion der Nachhallzeitmessung ohne Instrumentarium sehr gering gehalten werden.

4.4 Neugestaltung der Ausstellung

Durch Absprache mit den planenden Architekten können Angaben zu den Bauteilaufbauten für die Sanierung gemacht werden, die letztlich für die Simulation und die akustische Bewertung grundsätzlich sind. Um den akustischen Zustand des Raumes wiederherzustellen wird es überdies notwendig sein, die vorgeschlagenen Bauteilaufbauten dahingehend mit akustisch wirksameren Konstruktionen in der Simulation anzupassen.

Die Vorgaben aus der Planung der Architekten und der Ausstellungsgestaltung sind wie folgt zu berücksichtigen:

Im Bereich des Deckenaufbaus wird davon ausgegangen, dass die Abstände der Decke zur Rohdecke gemäß des Bestandes erhalten bleiben. Eine Untersuchung der Decke in Trockenbauvariante wurde von seitens der Architekten und des Deutschen Museums gewünscht. Aus diesem Grund werden zwei Varianten für den Aufbau der Decke in Trockenbauweise vorgeschlagen.

In Variante 1 wird eine doppelschalige geschlossene Gipskarton-Decke mit jeweils zwei Lagen zu je $7,5 \text{ kg/m}^2$, mit einem gesamten Flächengewicht von 15 kg/m^2 vorgeschlagen. Die Resonanzfrequenz der Decke liegt dabei je nach Abstand zur Rohdecke bei 17 Hz bis 19 Hz und damit außerhalb des hörbaren Bereichs.

In der Variante 2 wird eine Konstruktion mit einem höheren Flächengewicht vorgeschlagen um das Schwingungsverhalten der Rabitzdecke im Bestand noch genauer nachzubilden. Hierbei sollte die Konstruktion aus einer dreischaligen geschlossenen Gipskartondecke bestehen. Beispielhaft wurden für die Berechnung der Resonanzfrequenz Produkte der Firma Knauf herangezogen. Zwei Lagen Knauf Silentboard zu je 17 kg/m^2 und eine Lage Knauf Fireboard mit 14 kg/m^2 , mit einem gesamten Flächengewicht von 48 kg/m^2 liefern eine Resonanzfrequenz der Decke je nach Abstand zur Rohdecke von 10 Hz bis 12 Hz und liegt damit ebenfalls außerhalb des hörbaren Bereichs. Die Resonanzfrequenz liegt mit dieser Konstruktion deutlich näher im Bereich der Rabitzdecke gemäß der Bestandsuntersuchung, siehe Kapitel 4.3.1.

Soll die Decke jedoch nach Entscheidung des Deutschen Museums wieder als Rabitzdecke ausgeführt werden, sollten folgende Eigenschaften mindestens eingehalten werden. Gemäß der Bestandsuntersuchung muss die neue Rabitzdecke eine Mindestdichte von 1200 kg/m^3 und eine Schichtdicke von mindestens 40 mm mit einer daraus resultierenden flächenbezogenen Masse von 50 kg/m^2 aufweisen. Die damit einhergehenden Resonanzfrequenzen dieser Decke in Rabitzausführung würden je nach Ab-

stand zur Rohdecke bei 9 Hz bis 11 Hz und damit außerhalb des hörbaren Bereichs liegen.

Für den Bodenaufbau nach Abstimmung mit den planenden Architekten ist ebenfalls ein Hohlraumboden vorgesehen, da darunter Elektrotrassen verlaufen. Dessen Bodenaufbau ist der Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Geplanter Bodenaufbau gemäß Abstimmung mit den planenden Architekten

Aufbauhöhe	Material
19 mm	Echtholz-Parkett verklebt
40 mm	Hohlraumboden
50 mm	Deckenhohlraum/ Stützenfüße inkl. ELT-Estrichkanäle h=40mm/ Leitungen
1 mm	Silikat-Tiefenimprägnierung
180 mm	Rohdecke

Bei der Berechnung der Resonanzfrequenz des geplanten Bodens wurden Hohlraumbodenplatten der Firma Lindner herangezogen. Deren Flächengewicht liegt bei einer Dicke von 40 mm bei 50kg/m². Durch Verklebung dieser mit einem Echtholz-Parkett wird eine flächenbezogene Gesamtmasse von ca. 60 kg/m² erreicht. Mit einem Abstand von 5 cm zum Rohboden liegt die Resonanzfrequenz des Hohlraumbodens bei 30 Hz bis 40 Hz und damit deutlich geringer als die Resonanzfrequenz des Parkettbodens im Bestand. Dies bedeutet, dass der neue Aufbau des Parkettbodens im Vergleich zum bisherigen Aufbau im Bestand nicht wesentlich zur Absorption tiefer Frequenzen im Bereich um die 125 Hz beiträgt, was letztlich zu einem wesentlichen Anstieg der Nachhallzeit im tiefen Frequenzbereich führt.

In der Neugestaltung der Ausstellung werden die Holzvertäfelungen der Heizkörper entfallen. Die übrigen Wandverkleidungen werden in Trockenbauweise ausgeführt. Des Weiteren wird in der neuen Ausstellung kein Teppich vorhanden sein, was letztlich einen Anstieg der Nachhallzeit im Bereich der hohen Frequenzen zur Folge hat. Abbildung 12 zeigt die Neuplanung der Ausstellungsflächen.

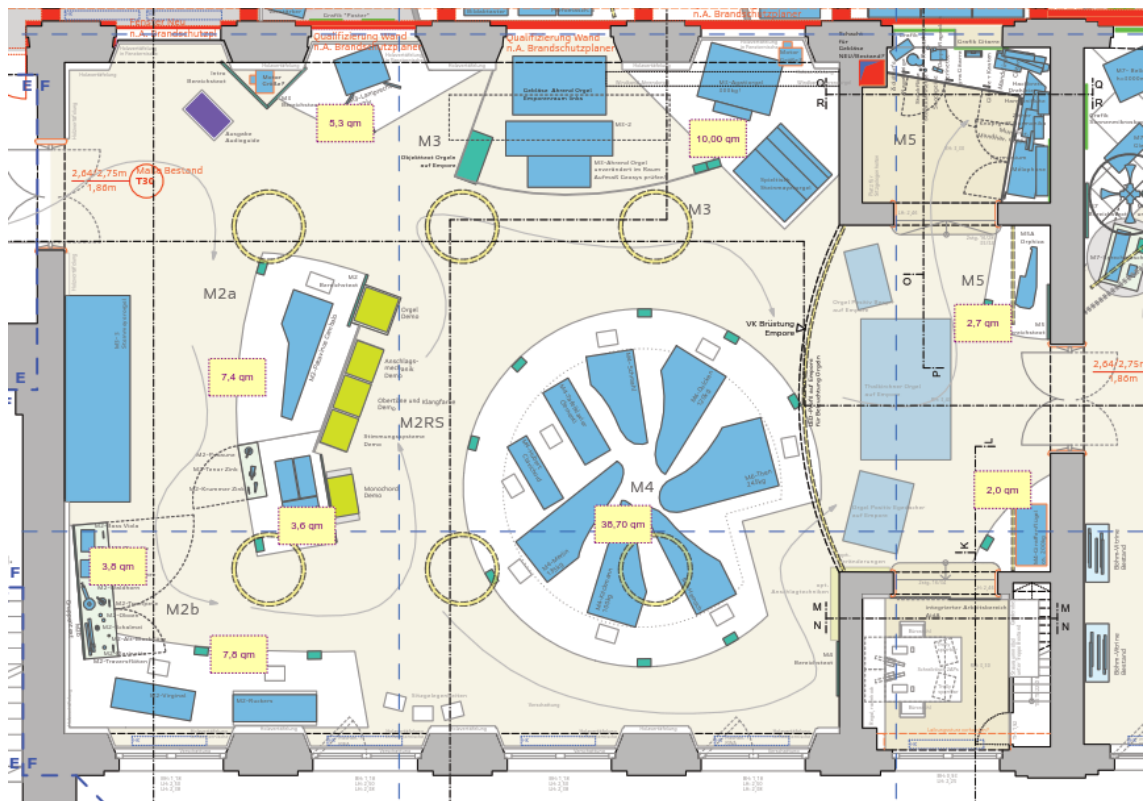


Abbildung 12: Grundriss mit geplanter Aufstellung der Instrumente inklusive Flächenangaben zu den Sockeln

Im Vergleich zum bisherigen Bestand sind in der neuen Ausstellung deutlich weniger Instrumente im Musiksaal vorhanden. Dies hat einen Anstieg der Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich zur Folge. Des Weiteren sollen die Instrumente auf Podeste gestellt werden. Diese Podeste sollen laut Stand Entwurf aus Holzwerkstoffen aufgeständert auf justierbaren Stellfüßen gefertigt werden und mit einem Kautschukbelag belegt werden. Alternativ ist für den Belag der Podeste auch ein technisches Gewebe denkbar. Ein Stoffbelag, wie Teppich oder Ähnliches trägt zur Absorption im hohen Frequenzbereich bei und wird im ersten Ansatz nicht empfohlen. Abbildung 13 zeigt einen Auszug der neuen Komponenten, welche in der Ausstellung im Musiksaal eingesetzt werden sollen.

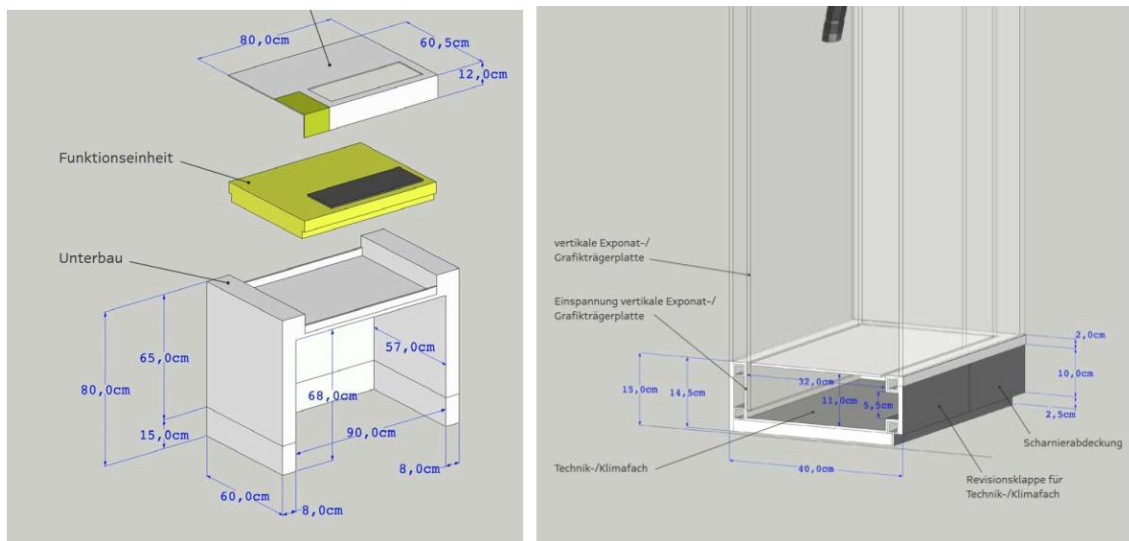


Abbildung 13: Auszug aus der Entwurfsplanung für Komponenten und Möblierung.

Die Ausstellungskomponenten, wie Podeste und Sockel, werden im ersten Ansatz ohne akustische Wirkung angesetzt, da eine Frequenzabstimmung der Schallabsorption auf die notwendigen Bereiche, in welchen Defizite auftreten technisch aufwändig zu realisieren ist, und die Funktionalität für die Ausstellung gegeben Falls beeinträchtigt werden würde. Aus dieser Überlegung besteht die Möglichkeit, die Komponenten mit üblichen Holzwerkstoffen zu realisieren. Tabelle 12 zeigt dabei die Schallabsorptionswerte der Materialien, welche für die Sanierung von seitens der planenden Architekten vorgeschlagen wurden.

Tabelle 12: Angaben zu Schallabsorptionsgraden für die Sanierung

Material:	α 125 Hz	α 250 Hz	α 500 Hz	α 1000 Hz	α 2000 Hz	α 4000 Hz
Decke in Trockenbau oder Rabitzkonstruktion	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04
Parkettfußboden als Hohlraumboden	0,08	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Trockenbauvorsatzschalen	0,08	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Instrumente	0,33	0,21	0,16	0,16	0,15	0,17

Durch die Erkenntnis der Schallabsorptionswerte des Instrumentariums, die Reproduktion der Nachhallzeitmessungen kann mit Hilfe der Angaben durch die planenden Architekten für die Neugestaltung der Ausstellung in die Simulation eingestiegen werden.

4.5 Variantenuntersuchung & Simulationsergebnisse

Nachfolgend wird das Vorgehen bei der Computersimulation mittels EASE dokumentiert. Dabei werden diverse Variantenuntersuchungen angestellt, um die neue Situation mit einer veränderten Ausstellung, an die Bestandssituation heranzuführen.

Im ersten Schritt werden die Ergebnisse der Simulation für den aktuellen Planungsstand, welcher durch Vorgaben durch die planenden Architekten gekennzeichnet ist, dargestellt. Ausgehend von der Implementierung der Decke, des Bodens und des Instrumentariums wird die Neugestaltung der Ausstellung mit der verringerten Anzahl an Exponaten in das Simulationsmodell eingebracht.

Folgende Abbildung zeigt die Bestandsmessung mit Rabitzdecke, mit Instrumenten Stand Okt. 2015, die den akustischen Zielzustand nach der Sanierung darstellt, die Bestandsmessung mit Rabitzdecke, ohne Instrumente Stand September 2016 und das Simulationsergebnis für den sanierten Zustand laut der aktuellen Planung.

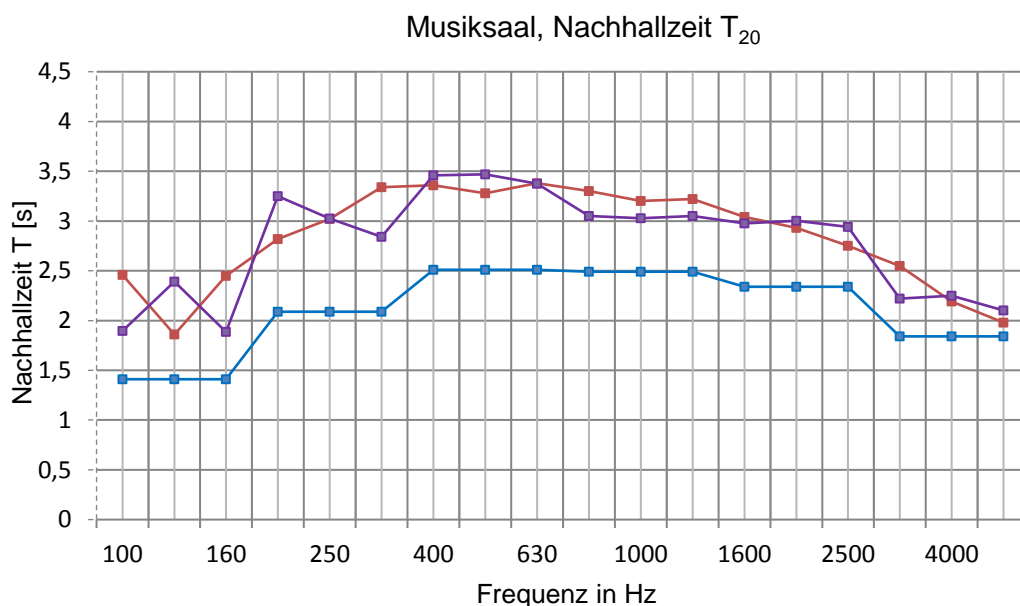


Abbildung 14: Nachhallzeitdiagramm mit Simulationsergebnis im Vergleich zum Bestand

- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, mit Instrumenten, Stand Okt. 2015
- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, ohne Instrumente, Stand Sep. 2016
- Simulation RT 20, Musiksaal nach Sanierung, mit Instrumenten.

Wie in Abbildung 14 erkennbar, weicht das Simulationsergebnis der Nachhallzeit mit den beschriebenen Aufbauten in der Sanierung deutlich vom Ausgangszustand vom Oktober 2015 ab. Als Ursache hierfür ist zum anderen der Fußbodenaufbau als Hohlboden zu nennen. Der geplante Hohlboden weist im Vergleich zum Bestand ein deutlich geringeres Schallabsorptionsvermögen im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 500 Hz auf. Ebenfalls resultiert durch den Entfall des Teppichbodens ein Anstieg der Nachhallzeit im Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 5000 Hz. Durch eine deutliche Reduzierung der Exponate in der neuen Ausstellungsfläche steigt die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich an.

Nachfolgend ist eine Bewertung des Klarheitsmaßes C_{80} und des Deutlichkeitsmaßes C_{50} für die 6 unterschiedlichen Positionen aus der Simulation gemittelt über die Frequenz aufgeführt. Diese Bewertungen wurden gewählt, da diese beiden Kriterien eine deutliche Aussage über das Sprechen und das Spielen von Instrumenten erlauben.

Tabelle 13: C_{50} und C_{80} Maße aus der Simulation

Messposition	C_{50}	C_{80}
M1	-1,5 dB	0,52 dB
M2	-4,09 dB	-1,91 dB
M3	-6,3 dB	-3,87 dB
M4	-5,56 dB	-2,88 dB
M5	-1,54 dB	-0,52 dB
M6	-5,16 dB	-3,19 dB
Gesamt	-4,02 dB	-1,98 dB

Die Werte für die Klarheitsmaße und das Deutlichkeitsmaß liegen beide in einem akzeptablen Bereich (siehe hierzu Kapitel 3.1.7). In den Anlagen Teil 3 sind des Weiteren Grafiken aus der Simulation aufgeführt.

Um das aktuelle Simulationsergebnis weiter an den gewünschten Zustand von der Nachhallzeitmessung 2015 anzupassen, werden im folgenden fünf Variantenuntersuchungen mit unterschiedlichen akustisch wirksamen Bauteilen durchgeführt. Da vor allem im Bereich der Wände vorgesehen ist, Trockenbau-Vorsatzschalen einzusetzen, wird im ersten Ansatz überprüft, Teilbereiche der Vorsatzschalen akustisch zu aktivieren. Hierbei wird eine gelochte Putzträgerplatte der Firma Knauf mit Akustikputz der Firma Fumi untersucht, die eine glatte, fugenlose Oberfläche realisierbar macht. Die Schallabsorptionswerte können der Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Absorptionsschallwerte der akustischen Maßnahmen für die Variantenuntersuchung

Variante & Material	α 125 Hz	α 250 Hz	α 500 Hz	α 1000 Hz	α 2000 Hz	α 4000 Hz
Var. 1: Knauf Cleaneo & Fumi Akustikputz 55mm	0,36	0,47	0,69	0,81	0,60	0,70
Var. 2: Knauf Cleaneo & Fumi Akustikputz 100mm	0,51	0,55	0,76	0,78	0,56	0,69
Var. 3: BER Holz-F A-BG 70mm	0,39	0,82	0,95	0,69	0,53	0,47
Var. 4: Lindner Nortec & Astrum	0,62	0,64	0,55	0,50	0,64	0,69
Var. 5: Lindner Nortec & Orbital	0,48	0,48	0,44	0,47	0,59	0,65

Diese Variante ermöglicht eine breitbandige Absorption, um das Defizit des Parkettbodens und der reduzierten Instrumente zu kompensieren. Ebenso lässt sich diese Variante mit der geplanten Aufbauhöhe von 55 mm direkt in die geplanten Trockenbauwände hervorragend integrieren. Eine alleinige Lösung mit Akustikputz auf Trockenbauwand würde kein ausreichendes Absorptionsvermögen erzeugen. Die Aktivierung der Wände als Lochflächenabsorber ist daher die praktikabelste und ansprechendste Lösung ohne dafür groß von der Planung der Architekten abweichen zu müssen.

- Variante 1: Putzträgerplatte D126 Cleaneo Akustik, Gerade Quadratlochung 12/25Q, mit PET-Folie (Rückseite werkseitig kaschiert), Dämmstoffauflage 40 mm Mineralwollauflage TWP 1 RD ($m^2 K/W$)=1,00, Gesamtaufbau 55 mm, Endbeschichtung Fumi Akustikvlies mit schalldurchlässiger Endbeschichtung Fumi Akustikputz S1, Belegung von ca. 35 m² im Wandbereich.

Folgende Abbildung zeigt das Simulationsergebnis für den sanierten Zustand lt. der aktuellen Planung, mit Einsatz der oben beschriebenen Akustikmaßnahme.

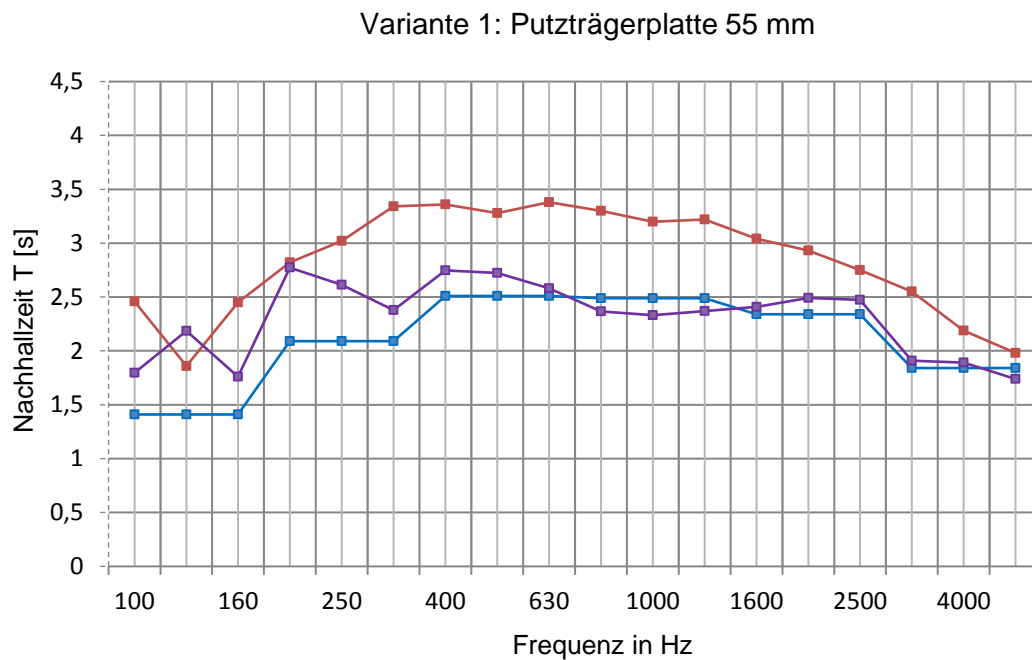


Abbildung 15: Simulationsergebnis der Variante 1

- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, mit Instrumenten, Stand Okt. 2015
- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, ohne Instrumente, Stand Sep. 2016
- Simulation RT 20, Musiksaal nach Sanierung, mit Instrumenten.

Durch den Einsatz der Wandmaßnahme kann die Nachhallzeitkurve im Frequenzbereich von 315 Hz bis 5000 Hz bereits relativ nahe an den gewünschten Zustand, laut Messung vom Oktober 2015 angepasst werden. Eine Belegung von circa 35 m² an der Südwest und an der Nordostseite des Raumes. Um jedoch auch die tiefen Frequenzen abzudecken, wird eine weitere Variante der Putzträgerplatte mit einem höheren Gesamtaufbau von 100 mm geprüft. Durch den vergrößerten Abstand zur Wand wird das Feder-Masse-System in den tiefen Frequenzen wirksamer, wie aus Tabelle 14 ersichtlich wird.

- Variante 2: Putzträgerplatte D126 Cleaneo Akustik, Gerade Quadratlochung 12/25Q, mit PET-Folie (Rückseite werkseitig kaschiert), Dämmstoffauflage 40 mm Mineralwollauflage TWP 1 RD (m² K/W)=1,00, Gesamtaufbau 100 mm, Endbeschichtung Fumi Akustikvlies mit schalldurchlässiger Endbeschichtung Fumi Akustikputz S1, Belegung von ca. 35 m² im Wandbereich.

Folgende Abbildung zeigt das Simulationsergebnis für den sanierten Zustand laut der aktuellen Planung, mit Einsatz der oben beschriebenen Akustikmaßnahme mit einem Abstand der Trockenbauvorsatzschale von 100 mm zur Wand.

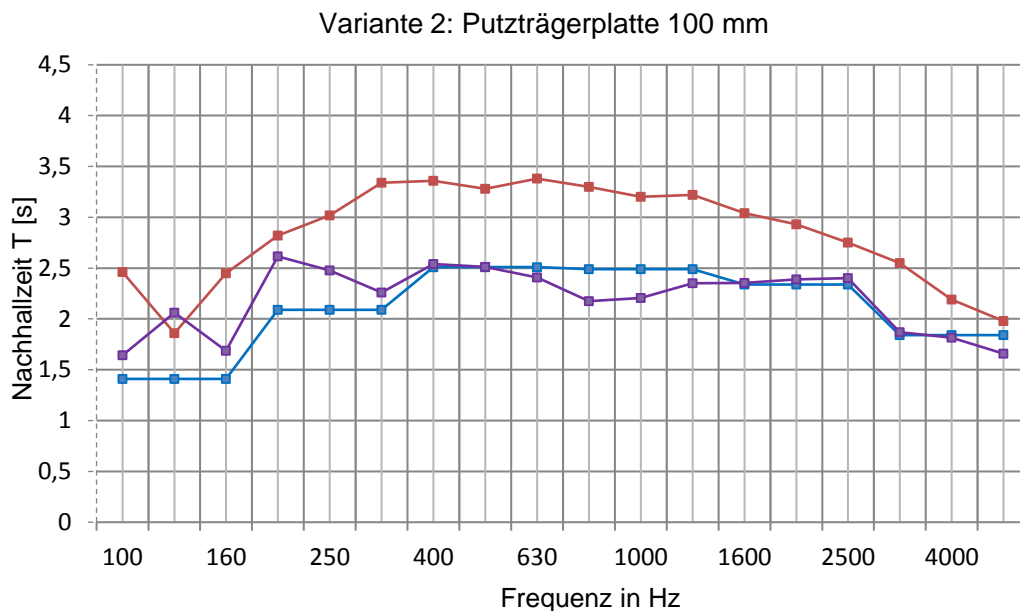


Abbildung 16: Simulationsergebnis der Variante 2

---- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, mit Instrumenten, Stand Okt. 2015

---- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, ohne Instrumente, Stand Sep. 2016

---- Simulation RT 20, Musiksaal nach Sanierung, mit Instrumenten.

Durch den Einsatz der Wandmaßnahme mit einem Gesamtaufbau von 100 mm wird eine Verbesserung bei tiefen Frequenzen erzielt, im Frequenzbereich von 800 Hz bis 1000 Hz tritt eine Unterschreitung der Zielkurve auf.

Im Weiteren wurde eine Variante mit einer akustisch wirksamen Holzplatte der Firma BER geprüft. Diese Ausführung hat einen kleineren Lochanteil und erzielt somit bessere Eigenschaften im tieffrequenten Bereich.

- Variante 3: BER Holz-F A-BG, Typ L 1/3-8, Lochdurchmesser d=1 mm Sichtseite, 3 mm Rückseite, Achsabstand 8mm; Trägerplatte aus Vermiculit in Baustoffklasse A1; 30 mm Caruso WLG 040, 70 mm Gesamtaufbauhöhe, Belegung von ca. 35 m² im Wandbereich.

Abbildung 17 zeigt das Simulationsergebnis mit der gelochten Holzplatte und einer Aufbauhöhe von 70 mm im Vergleich zu den Bestandsmessungen.

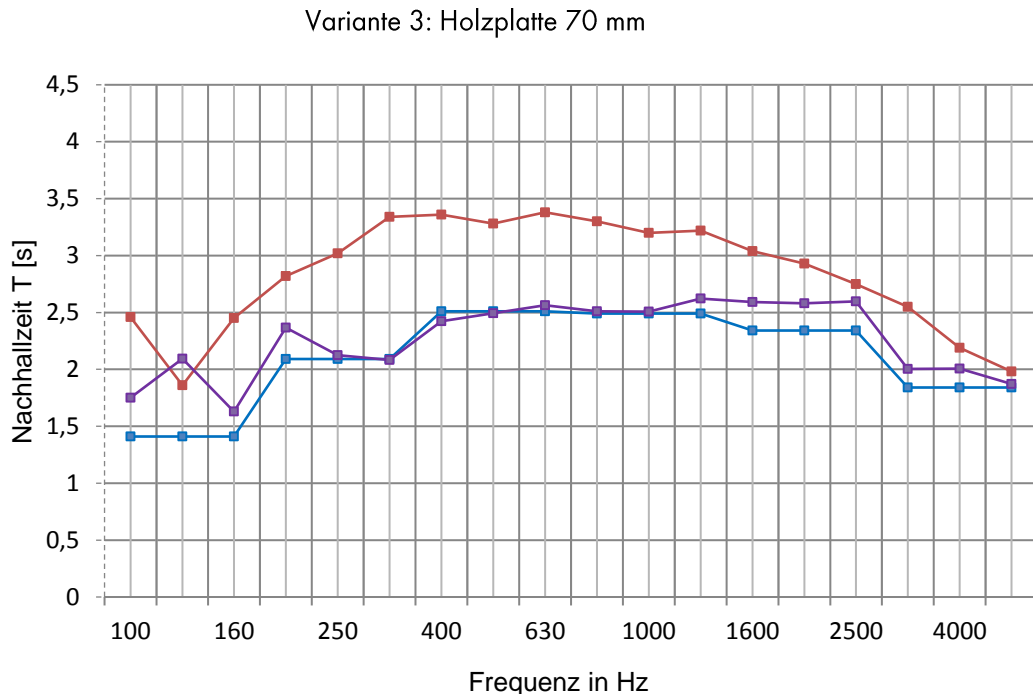


Abbildung 17: Simulationsergebnis der Variante 3

--- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, mit Instrumenten, Stand Okt. 2015

--- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, ohne Instrumente, Stand Sep. 2016

--- Simulation RT 20, Musiksaal nach Sanierung, mit Instrumenten.

Im Vergleich zur gelochten Vorsatzschale mit fumi Akustikputz können bei dieser Variante im Frequenzbereich bei ca. 200 Hz günstigere Ergebnisse erzielt werden. Die Überschreitung bei 125 Hz bleibt, wie bei den bereits betrachteten Varianten, bestehen. Im hohen Frequenzbereich zwischen 1600 Hz und 4000 Hz wird die Zielkurve geringfügig überschritten. Da bei Veranstaltungen die Schallabsorption bei hohen Frequenzen aufgrund der Anwesenheit der Zuschauer stark zunimmt, wird die Überschreitung bei hohen Frequenzen als akzeptabel bzw. günstig eingeschätzt.

Die weitere Überlegung ist eine akustisch wirksame Aktivierung der Podeste, auf denen die Exponate stehen, zu überprüfen. Die Verwendung der Podeste als Resonatoren kann eine ansprechende Lösung darstellen, da die Planung der Architekten unbeeinflusst bleibt. Hierbei ist grundsätzlich auf eine entkoppelte Aufstellung der Instrumente, welche bespielt werden sollen, zu achten, um eine unerwünschte Überhö-

hung der tiefen Frequenzen durch Ankopplung des Instrumentes an den Podestboden zu vermeiden. Es wurde dabei eine Lösung der Firma Lindner untersucht, die mit zwei unterschiedlichen Teppichbelägen auf den Podesten empfiehlt.

- Variante 4: Lindner Nortec acoustic, Calciumsulfatplatten, Dicke 38 mm, Aufbauhöhe 250 mm, Belag Velours, Typ Astrum, Firma Toucan-T, Belegung von ca. 81,3 m².

Abbildung 18 zeigt das Simulationsergebnis mit dem Podestaufbau der oben beschriebenen Akustikmaßnahme.

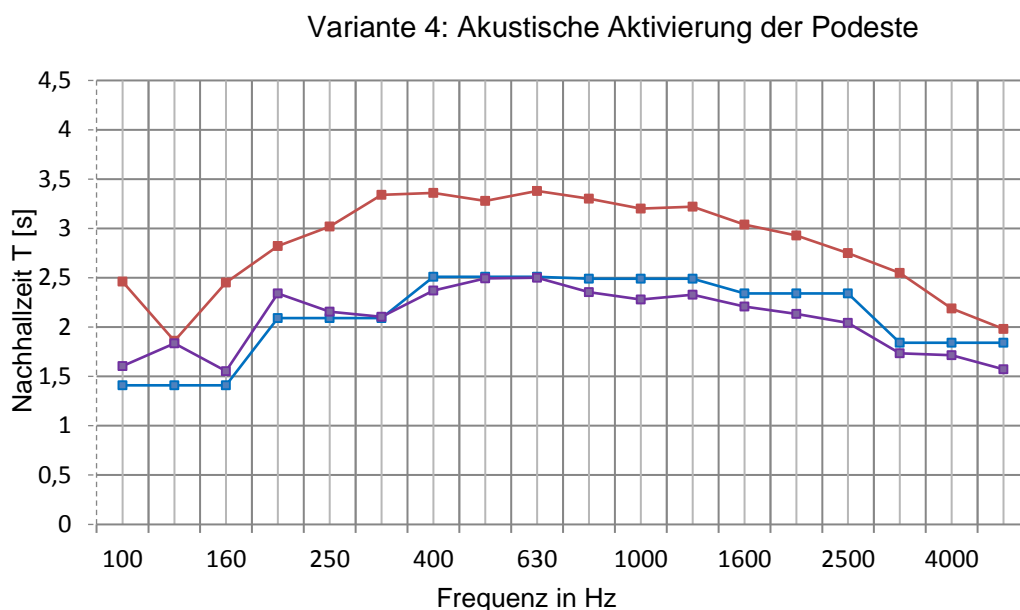


Abbildung 18: Simulationsergebnis der Variante 4

- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, mit Instrumenten, Stand Okt. 2015
- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, ohne Instrumente, Stand Sep. 2016
- Simulation RT 20, Musiksaal nach Sanierung, mit Instrumenten.

Im Vergleich zu den Wandmaßnahmen können bei dieser Variante im Frequenzbereich bei ca. 125 Hz und 250 Hz deutlich günstigere Ergebnisse erzielt werden. Die Überschreitung bei 125 Hz bleibt bestehen. Im Frequenzbereich ab 1000 Hz wird die angestrebte Nachhallzeitkurve aufgrund der Schallabsorptionseigenschaften des Teppichbelages unterschritten.

Eine weitere Variante wird im Folgenden mit einem anderen Teppichbelag aufgelistet. Dieser Teppich weist im Vergleich zu der oben beschriebenen Lösung andere Schallabsorptionskennwerte auf.

- Variante 5: Lindner Nortec acoustic, Calciumsulfatplatten, Dicke 38 mm, Aufbauhöhe 250 mm, Belag Velours, Typ Orbital, Firma Fabromont, Belegung von ca. 81,3 m².

Das Simulationsergebnis ist in der nachfolgenden Abbildung graphisch dargestellt.

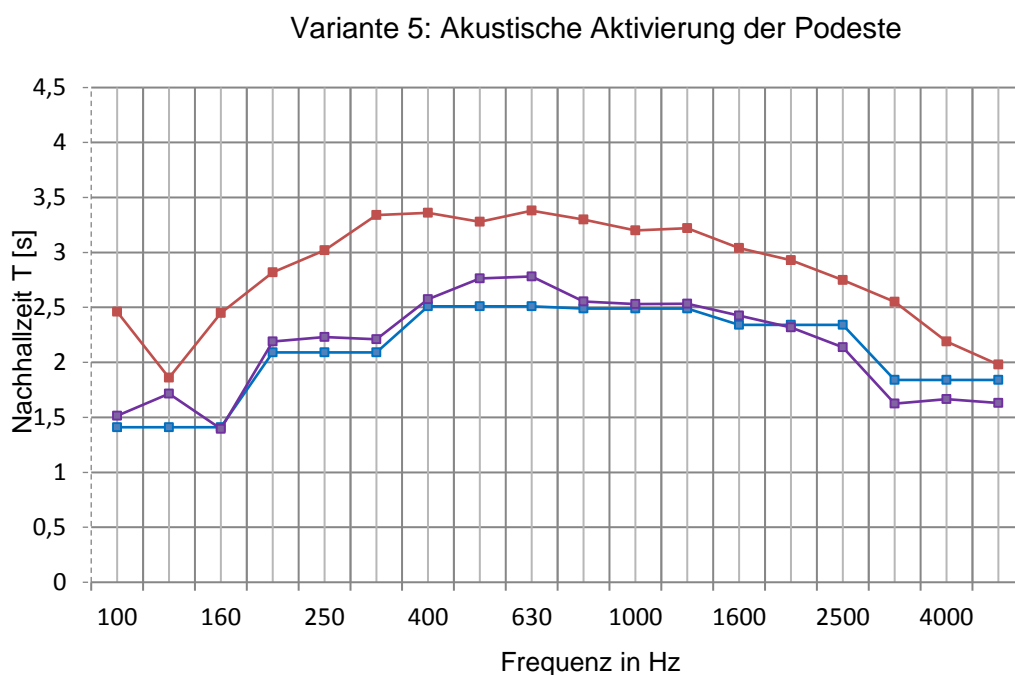


Abbildung 19: Simulationsergebnis der Variante 5

--- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, mit Instrumenten, Stand Okt. 2015

--- Messung RT 20, Musiksaal mit Rabitz, ohne Instrumente, Stand Sep. 2016

--- Simulation RT 20, Musiksaal nach Sanierung, mit Instrumenten.

Die verringerte Schallabsorptionseigenschaft des Teppichbelags in Variante 5 zeigt hier erst Unterschreitungen der Zielkurve im Frequenzbereich von 2500 Hz bis 5000 Hz. Ähnlich wie in Variante 4 werden im Frequenzbereich bei circa 125 Hz und 250 Hz günstige Ergebnisse erzielt. Jedoch kommt es bei dieser Variante zu einer leichten Überschreitung der Zielkurve in den Frequenzbereich 500 Hz und 630 Hz. Variante 5 zeigt mit den simulierten Verhältnissen eine weitestgehend ideale Annäherung an den

akustischen Sollzustand. Tabelle 14 zeigt aus diesem Grund für den Vergleich zum Ausgangszustand die C50 und C80 Werte der Variante 5.

Tabelle 15: Vergleich C50 und C80

	C₅₀	C₈₀
Erste Simulation	-4,02 dB	-1,98 dB
Variante 5	-3,49 dB	-1,05 dB

Hieraus wird ersichtlich, dass kaum nennenswerte Veränderungen hinsichtlich der Durchsichtigkeit und Deutlichkeit auftreten.

4.6 Ergebnis und Bewertung

Durch die Anpassung der Simulation des Planungsvorschlages der Architekten konnten verschiedene Varianten erarbeitet werden, die mit unterschiedlichen akustisch wirksamen Maßnahmen den akustischen Zustand vom Oktober 2015 nahezu reproduzieren.

Die Varianten 1 bis 3 zeigen durch die Aktivierung der Wände eine sehr gute Annäherung an den Ausgangszustand vom Oktober 2015. Durch die relativ gute Integrierbarkeit der akustischen Maßnahmen in das bestehende Konzept der Planung und die damit ermittelte Übereinstimmung mit der Zielkurve, stellen die Varianten 1 und 3 als eine vertretbare Lösung dar. Bei Variante 2 zeigt sich deutlich durch die vergrößerte Aufbauhöhe von 100 mm, dass der mittlere Frequenzbereich bei 800 Hz bis 1000 Hz etwas zu stark bedämpft wird. Letztlich kann hier trotzdem eine relative Übereinstimmung mit der Zielkurve festgestellt werden.

Zu den Varianten 4 und 5 ist eine Bewertung hinsichtlich der Wechselwirkung mit den akustisch aktivierten Podesten zu treffen. Durch die akustische Aktivierung der Podeste werden durch den gelochten Hohlboden die tiefen Frequenzen von 100 Hz bis 250 Hz und durch den Teppichbelag die hohen Frequenzen von 2500 Hz und 5000 Hz stark bedämpft. Gemäß der in Kapitel 3.1.8 beschriebenen Abstrahlcharakteristiken von Klavier und Cembali wird der Schall frequenzabhängig über den Resonanzboden nach oben und nach unten abgestrahlt. Hohe Frequenzen werden überwiegend nach oben, über die Öffnung und Reflexionen am Deckel in den Raum verteilt. Der Teppichbelag sollte daher den Klangcharakter des Instrumentes durch seine bedämpfende Wirkung nur geringfügig beeinflussen. Der gelochte Hohlboden kann jedoch den Klangcharakter der Instrumente, beim Klavier mehr als beim Cembalo, durch die unmittelbare Absorption des zum Boden hin abgestrahlten tieffrequenten Schalls, nennenswert beeinflussen. Durch die nahezu gleiche Aufstellung der Orgeln, die vorwiegend über das Gesamtvolumen des Raumes klingen, werden keine nennenswerten Beeinflussungen des Klangcharakters der Instrumente erwartet.

Zusammenfassend sind in Tabelle 15 noch einmal die verschiedenen Varianten mit einer kurzen Bewertung aufgeführt.

Tabelle 16 Zusammenfassung und Bewertung des Ergebnisses hinsichtlich Einhaltung der Zielkurve für die Nachhallzeit.

Variante	Zielkurve Nachhallzeit [T] Bewertung tiefe Fre- quenzen	Zielkurve Nachhallzeit [T] Bewertung mittlere Fre- quenzen	Zielkurve Nachhallzeit [T] Bewertung hohe Frequenzen	Anmerkungen und Hinweise
Variante 1: Wand: Knauf + Fumi Akus- tikputz Aufbauhöhe 55 mm	Abweichun- gen von der Zielkurve; T = 2,0 bis 2,5 s gegen- über Zielwert 1,5 s bis 2,0 s	Im wesentlichen Übereinstim- mung mit der Zielkurve	Übereinstim- mung mit der Zielkurve	Höhere Nachhall- zeitwerte verblei- ben bei tiefen Frequenzen: ver- tretbare Lösung.
Variante 2: Wand: Knauf + Fumi Akus- tikputz Aufbauhöhe 100 mm	Abweichun- gen von der Zielkurve; T = 2,0 bis 2,5 s gegen- über Zielwert 1,5 s bis 2,0 s	Etwas zu starke Bedämpfung bei 800 Hz bis 1000 Hz	Übereinstim- mung mit der Zielkurve	Höhere Nachhall- zeitwerte verblei- ben bei tiefen Frequenzen, al- lerdings nicht nennenswert hö- her als im middle- ren Frequenzbereich: vertretbare Lö- sung.
Variante 3: Wand: BER Akus- tikplatte Aufbauhöhe 70 mm	Bei 200 Hz deutliche An- näherung an die Zielkurve, bei 125 Hz T = 2,0 s ge- genüber 1,5 s.	Übereinstim- mung mit der Zielkurve	Im Wesentlichen Übereinstim- mung mit der Zielkurve	Sehr weitgehende Annäherung an die Zielkurve; die Abweichung bei 125 Hz ist ver- tretbar; insgesamt eine vertretbare Lösung

Variante 4: Podeste: Lindner Nortec Belag Ve- lours, Ast- rum	Bei 200 Hz deutliche An- näherung an die Zielkurve, bei 125 Hz $T = 2,0$ s ge- genüber 1,5 s.	Übereinstim- mung mit der Zielkurve	Im Wesentlichen Übereinstim- mung mit der Zielkurve	! Nennenswerte Beeinflussung der Klangcharakteris- tik der Instrumen- te; keine empfehlenswerte Lösung
Variante 5: Podeste: Lindner Nortec Belag Ve- lours, Or- bital	Bei 200 Hz deutliche An- näherung an die Zielkurve, bei 125 Hz $T = 1,75$ s gegenüber 1,5 s.	Übereinstim- mung mit der Zielkurve, leich- te Überhöhung bei 500 Hz bis 630 Hz	Im Wesentlichen Übereinstim- mung mit der Zielkurve	! Nennenswerte Beeinflussung der Klangcharakteris- tik der Instrumen- te; keine empfehlenswerte Lösung

4.7 Fazit

Das Ziel der Arbeit, ein fundiertes Ergebnis für die mögliche Wiederherstellung der akustischen Eigenschaften des Musiksaals des Deutschen Museums nach Sanierung und Neugestaltung der Ausstellungsflächen zu erhalten, wurde erreicht.

Dabei wurde anhand der Analyse der Bestandsmessung im Oktober 2015 ein Simulationsmodell erstellt, das durch Implementierung der physikalischen Eigenschaften der Decke und des Bodens und der daraus resultierenden Absorptionswirkung der Instrumente, für die Simulation der Neugestaltung der Ausstellung verwendet werden konnte.

Weiterhin wurden verschiedene akustische Maßnahmen geprüft, die den aktuellen Planungsstand der Architekten dahingehend verbesserten, sodass es zu einer annähernden Übereinstimmung mit der Zielkurve kam. Um mit den beschriebenen Wandmaßnahmen auch im tiefen Frequenzbereich weitest gehende Annäherung an die Zielwertkurve zu erreichen, wären zusätzliche Maßnahmen für den tiefen Frequenzbereich notwendig. Die konstruktiv einfachste und wirkungsvollste Maßnahme wäre der Einsatz eines Plattenschwingers. Da jedoch eine zusätzlich benötigte Wandfläche aufgrund der relativ dichten Wandbelegung vorrausichtlich nicht realisiert werden kann, obliegt es der Entscheidung des Deutschen Museums, welche der aufgeführten Varianten zum Einsatz kommen. Im Hinblick auf die Nachhallzeit erzielen die Variante 1 und 2 Knauf Cleaneo mit Fumi Akustikputz und die Variante 3 Akustikplatte BER Holz-F vergleichbare Ergebnisse und stellen eine vertretbare Lösung dar. Hinsichtlich der Nachhallzeit ist die akustische Aktivierung der Podeste ebenfalls in Ordnung, allerdings führt die absehbare, erhebliche Beeinflussung der Abstrahlcharakteristik der Instrumente zu der Einschätzung, dass die Varianten 4 und 5 nicht empfehlenswert sind.

Die Ergebnisse wurden in einem Bericht zusammengefasst und für die weitere Planung und Ausführung an das Deutsche Museum übermittelt. Da es sich bei dieser Arbeit um einen rein planerischen Vorschlag zum Erhalt der Akustik handelt, kann die tatsächliche Sanierung im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht bis zur Fertigstellung erfasst werden. Auch die Entscheidung über die Rekonstruktion der Decke in Rabetz- oder Trockenbauausführung befindet sich noch im Diskurs zwischen den planenden Architekten und den Zuständigen Kuratoren des Deutschen Museums.

Literaturverzeichnis

- [Ahnert 1993] AHNERT Wolfgang, STEFFEN Frank: Beschallungstechnik. Grundlagen und Praxis. 1. Auflage. S. Hirzel Verlag. Stuttgart Leipzig, 1993.
- [Beucher 2015] BEUCHER Ottmar: Signale und Systeme: Theorie, Simulation, Anwendung. Eine beispielorientierte Einführung mit MATLAB. 2., ergänzte Auflage. Springer Vieweg Verlag. Berlin Heidelberg, 2015.
- [Cremer 1976] CREMER Lothar, HELMUT A. Müller: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band 2 Wellentheoretische Raumakustik. 2., völlig neubearbeitete Auflage. S. Hirzel Verlag. Stuttgart, 1976.
- [Cremer 1978] CREMER Lothar, HELMUT A. Müller: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band 1 Geometrische Raumakustik, Statistische Raumakustik, Psychologische Raumakustik. 2., neu gegliederte und völlig neubearbeitete Auflage. S. Hirzel Verlag. Stuttgart, 1978.
- [Dickreiter 2008] DICKREITER Michael, DITTEL Volker, HOEG Wolfgang, WÖHR Martin: Handbuch der Tonstudioteknik. Band 1. 7., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. K.G: Saur Verlag. München, 2008.
- [DIN 18041] DIN 18041 – Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung. Beuth-Verlag. Berlin, 2016.
- [DIN EN ISO 18233] Akustik – Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik. Beuth-Verlag. Berlin, 2006.
- [DIN EN ISO 3382-1] DIN EN ISO 3382-1 – Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 1: Aufführungsräume. Beuth-Verlag. Berlin, 2009.
- [DIN EN ISO 3382-2] DIN EN ISO 3382-2 – Akustik – Messung von Parametern der

- 3382-2] Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen. Beuth-Verlag. Berlin, 2007.
- [EASE 2009] AHNERT Wolfgang: EASE 4.3 Users Manual. Renkus-Heinz Inc. & Acoustic Design Ahnert. Berlin, 2009.
- [Fasold 2003] FASOLD Wolfgang, VERES Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. 2. Auflage. Huss Medien, Verlag für Bauwesen. Berlin, 2003.
- [Fuchs 2017] FUCHS Helmut V.: Raum-Akustik und Lärm-Minderung. Konzepte mit innovativen Schallabsorbern und –dämpfern. 4. Auflage. Springer Vieweg Verlag. Berlin, 2017.
- [Gösele 1997] GÖSELE Karl, SCHÜLE Walter, KÜNZEL Helmut: Schall, Wärme, Feuchte, Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau. 10., völlig neubearbeitete Auflage. Bauverlag GmbH. Wiesbaden Berlin, 1997.
- [Lazarus 2007] LAZARUS Hans, SUST Charlotte A., STECKEL Rita, KULKA Marko, KURTZ Patrick: Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation. 1. Auflage. Springer Verlag. Berlin Heidelberg, 2007.
- [Meyer 2003] MEYER Jürgen: Wechselbeziehungen zwischen Orgel und Raumakustik. DAGA 2003 in Aachen. S.518-519. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.. Aachen, 2003.
- [Meyer 2015] MEYER Jürgen: Akustik und musikalische Aufführungspraxis. 6. erweiterte Auflage. PPV Medien GmbH. Bergkirchen, 2015.
- [Möser 2003] MÖSER Michael (Hrsg.), MÜLLER Gerhard: Taschenbuch der Technischen Akustik. 3., erweiterte und überarbeitete Auflage. Springer Verlag. Berlin und München, 2003.
- [Möser 2010] MÖSER Michael: Messtechnik der Akustik. 1. Auflage. Springer Verlag. Berlin Heidelberg, 2010.
- [Möser 2015] MÖSER Michael: Technische Akustik. 10., aktualisierte Auflage. Springer Vieweg Verlag. Berlin Heidelberg, 2015.

-
- [Nocke 2014] NOCKE Christian: Raumakustik im Alltag. Hören - Planen - Verstehen. 1. Auflage. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart, 2014.
- [Schirmer 2006] SCHIRMER Werner: Technischer Lärmschutz. Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag. Berlin, 2006.
- [Veit 2017] VEIT Ivar: Absorber auf der Reihe. In: Trockenbau Akustik, 06.2017. S. 30-32. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG. Köln, 2017.
- [Weinzierl 2008] WEINZIERL Stefan: Handbuch der Audiotechnik. 1. Auflage. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2008.

Anlagen, Teil 1: Fotodokumentation

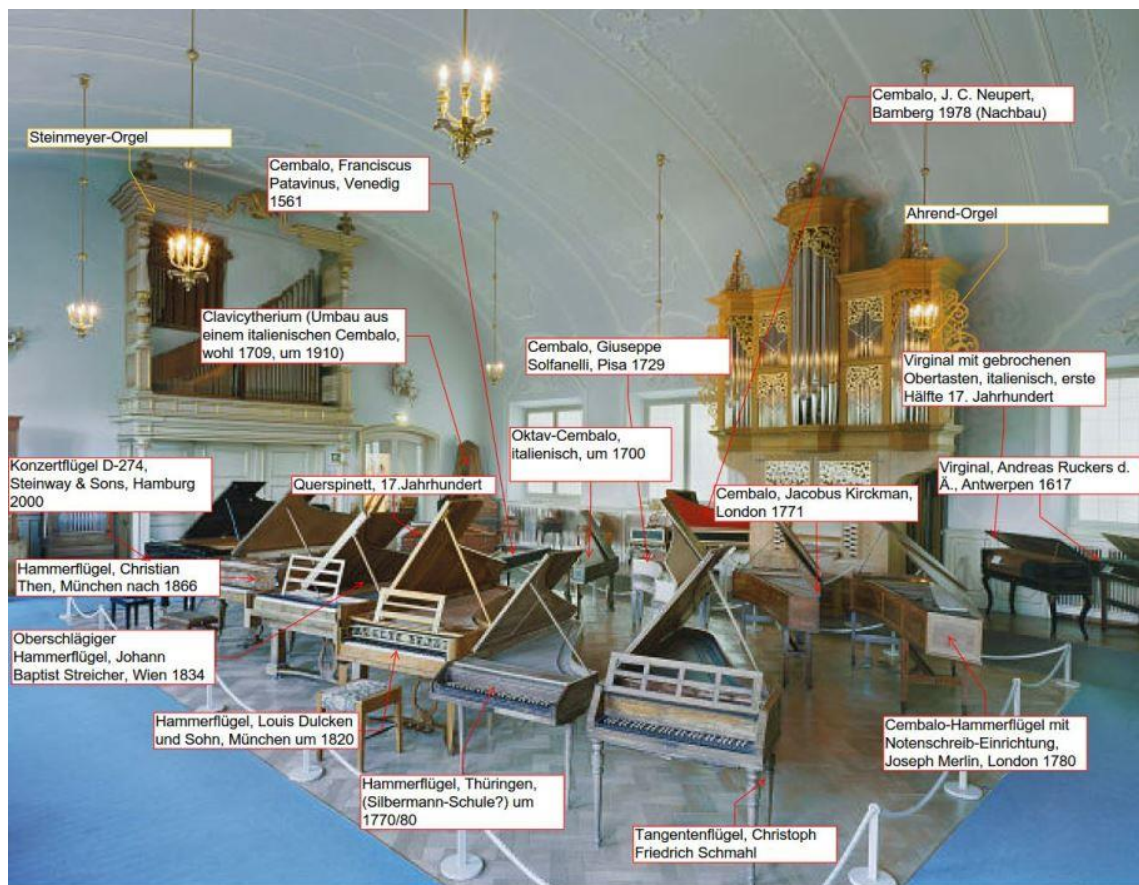


Abbildung 20: Exponate im Bestand im Musiksaal des Deutschen Museums



Abbildung 21: Musiksaal des Deutschen Museums vor der Sanierung



Abbildung 22: Musiksaal ohne Exponate

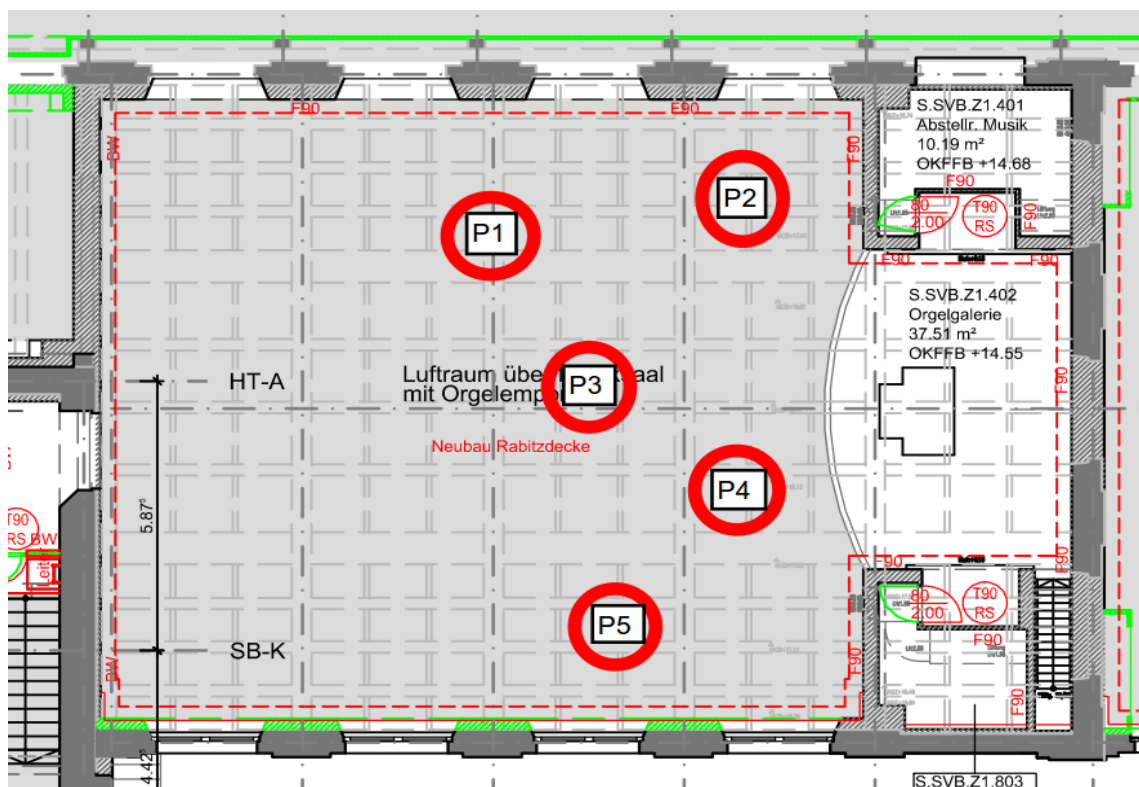


Abbildung 23: Markierung der Probenentnahmestellen aus der Rabitzdecke im Musiksaal



Abbildung 24: Rabitzdecke während des Abrisses mit Sicht auf die Abhängung



Abbildung 25: Entnahme der Proben für die Analyse



Abbildung 26: Probe 1 aus der Decke

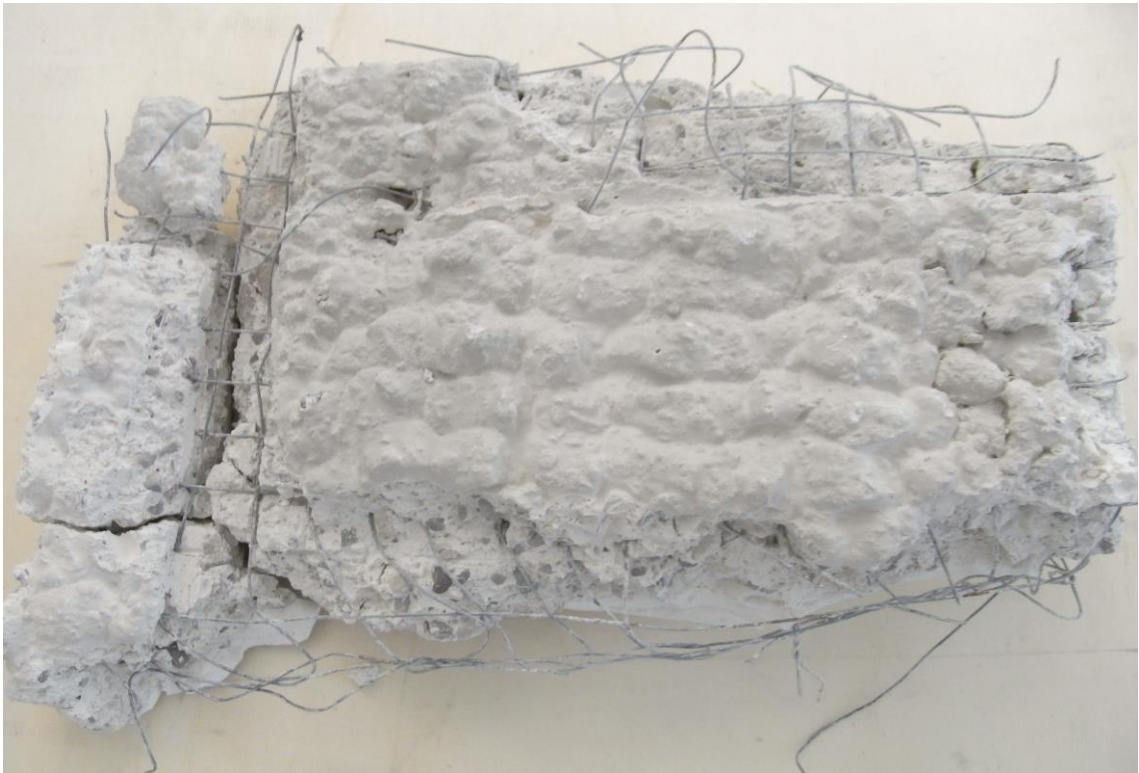


Abbildung 27: Rückansicht Probe 1 mit erkennbarem Rabitzgitter



Abbildung 28: Probe 2

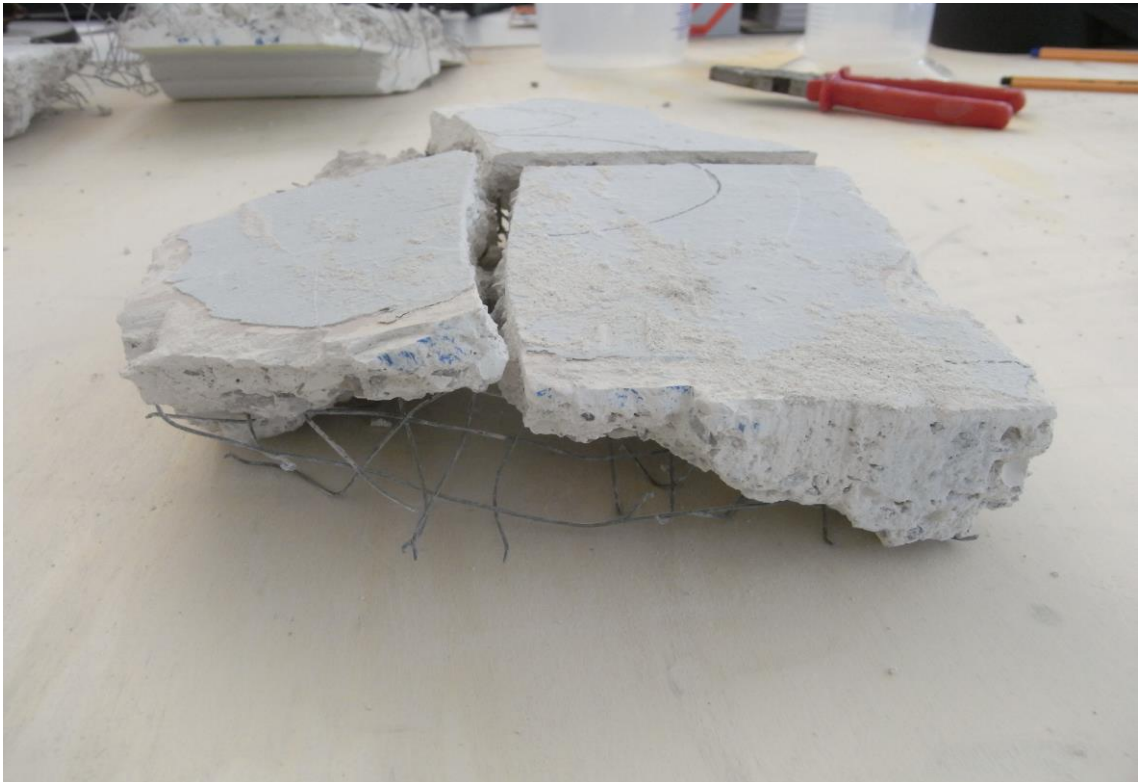


Abbildung 29: Probe 3



Abbildung 30: Probe 4



Abbildung 31: Probe 5



Abbildung 32: Musiksaal ohne Rabitzdecke mit dahinter liegender Deckenkonstruktion aus Beton



Abbildung 33: Bauteilöffnung des Parkettbodens im Bestand

Anlagen, Teil 2: Messdokumentation

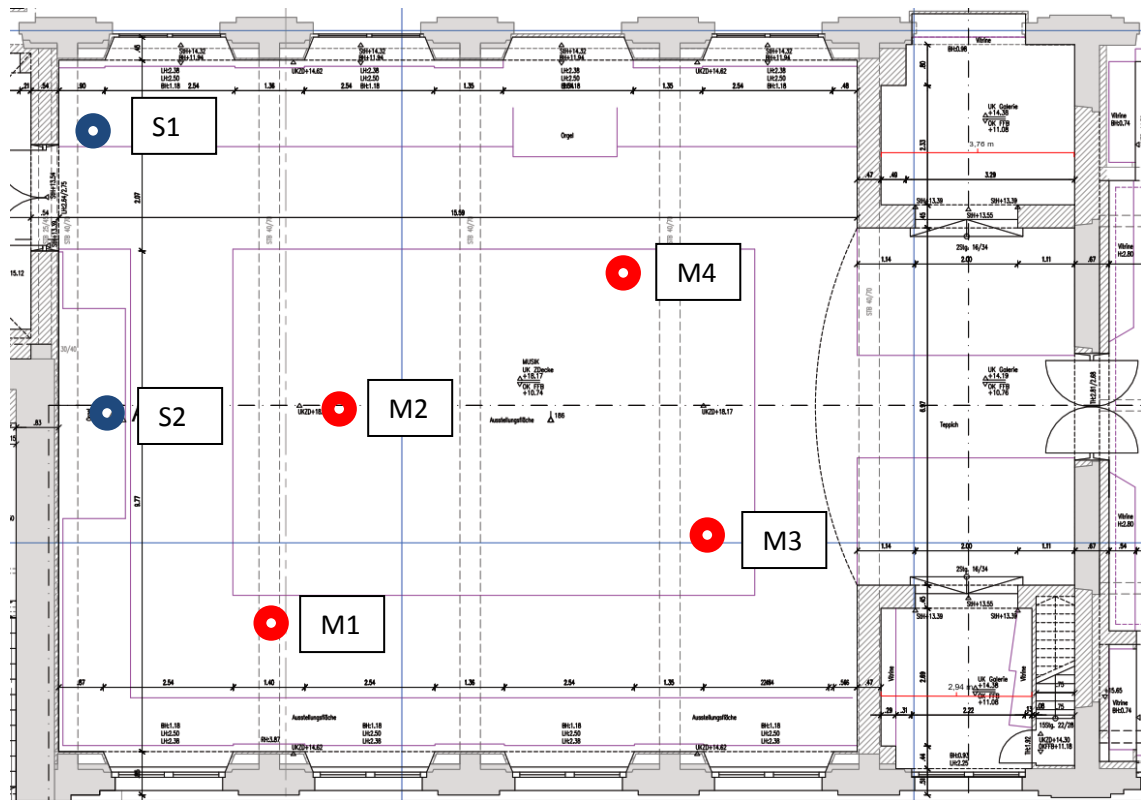


Abbildung 34: Mess- und Sendepositionen der Nachhallzeitmessung vom 29.10.2015 anhand der Messdokumentation durch die Möhler & Partner AG

	EDT	RT15	RT20	RT30
125 Hz	1.38 [BT]	1.43 [BT]	1.40 [BT]	1.46 [BT]
250 Hz	2.02 [BT]	2.04 [BT]	2.06 [BT]	2.09 [BT]
500 Hz	2.49 [BT]	2.49 [BT]	2.49 [BT]	2.49 [BT]
1 kHz	2.48 [BT]	2.47 [BT]	2.49 [BT]	2.48 [BT]
2 kHz	2.34 [BT]	2.33 [BT]	2.34 [BT]	2.33 [BT]
4 kHz	1.81 [BT]	1.83 [BT]	1.84 [BT]	1.84 [BT]

Abbildung 35: Numerische Tabelle der Nachhallzeitmessung vom 29.10.15

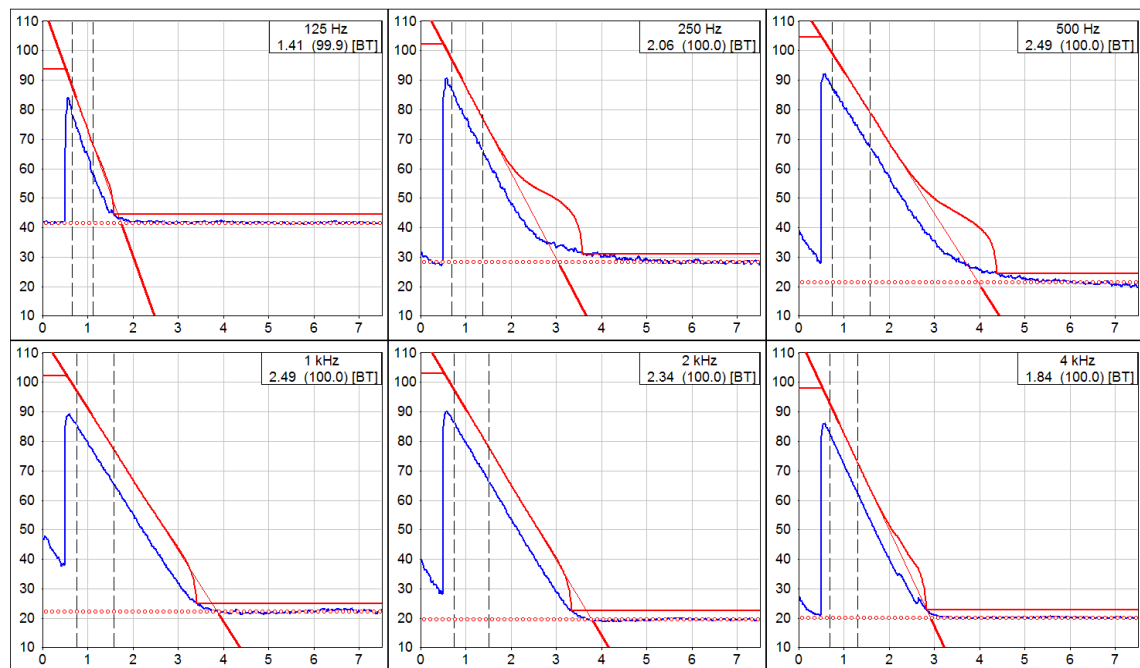


Abbildung 36: Graph der Abklingkurve der Nachhallzeitmessung vom 29.10.15

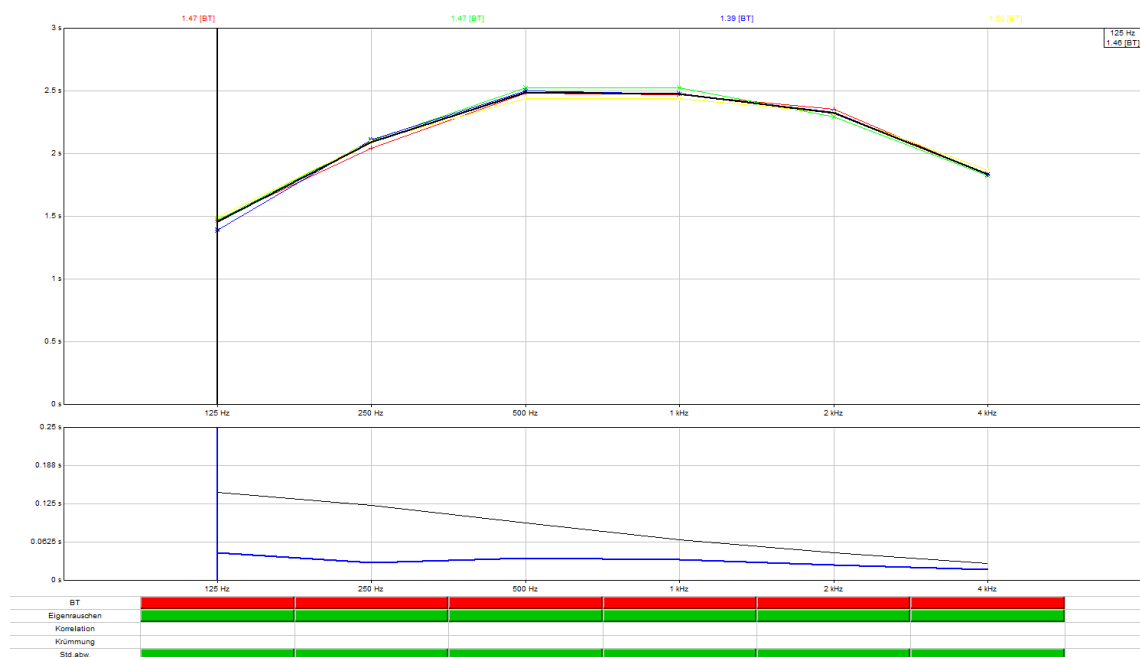


Abbildung 37: Spektrumgraph der vier Messpositionen der Messung vom 29.10.15

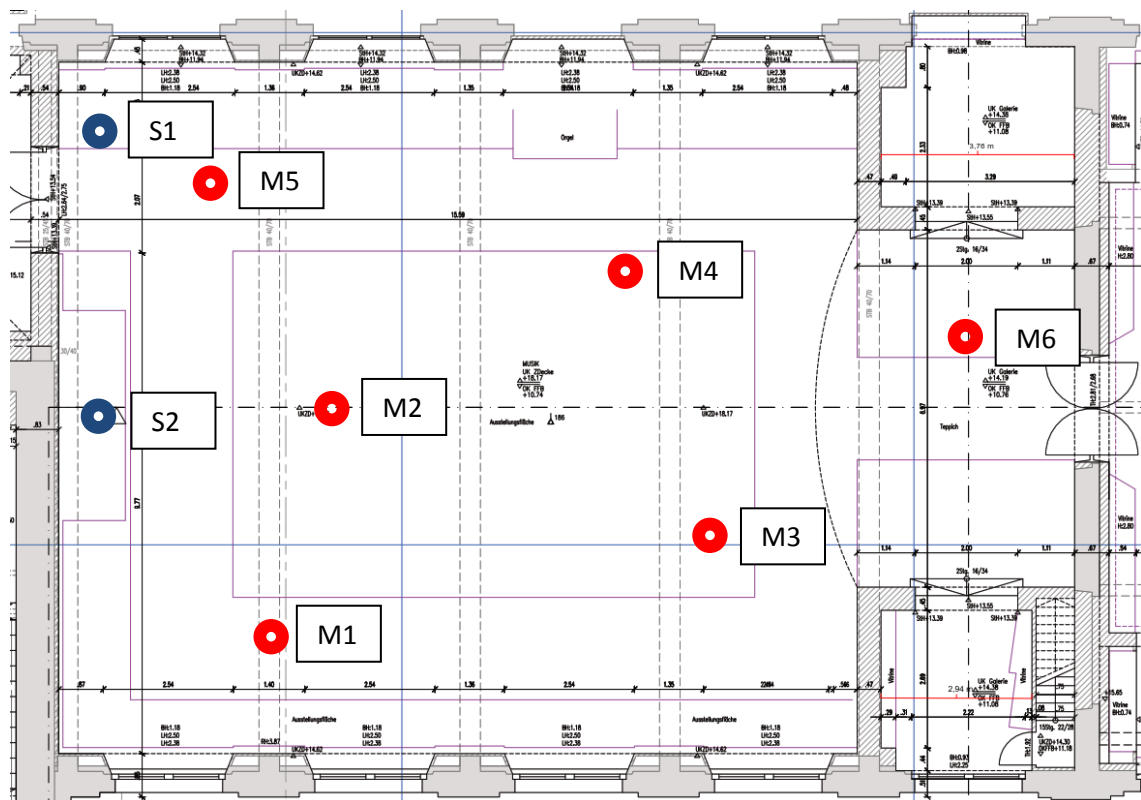
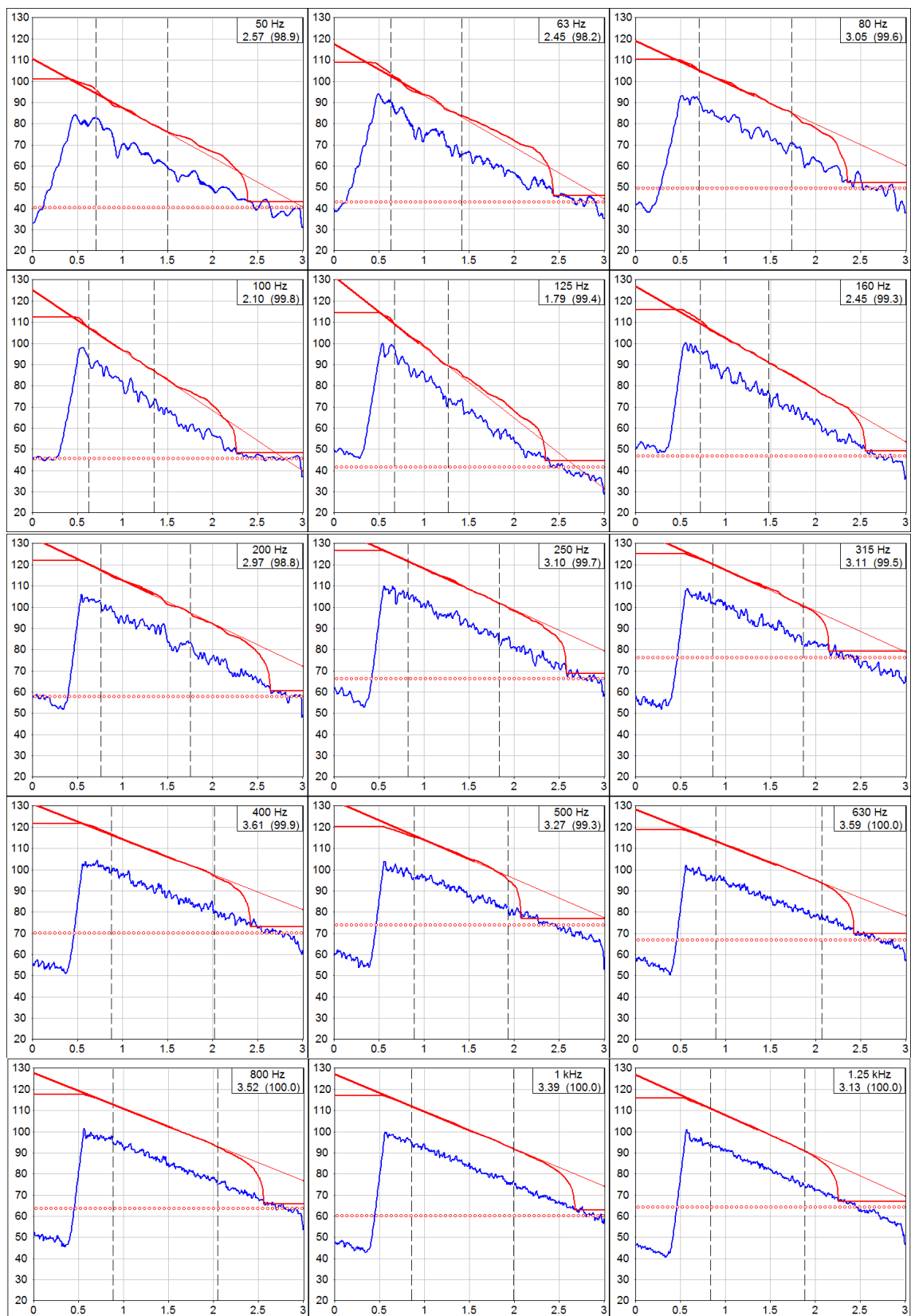


Abbildung 38: Mess- und Sendepositionen der Nachhallzeitmessung vom 08.09.2016 anhand der Messdokumentation durch die Möhler & Partner AG

	EDT	RT15	RT20	RT30
50 Hz	2.29	2.53	2.42	2.21
63 Hz	2.18	2.60	2.52	2.56
80 Hz	3.18	3.10	2.84	2.67
100 Hz	1.97	2.10	2.19	2.16
125 Hz	2.06	1.88	1.81	1.91
160 Hz	2.05	2.40	2.45	2.43
200 Hz	3.37	3.05	2.85	2.71
250 Hz	3.44	3.14	3.08	2.92
315 Hz	3.27	3.35	3.24	3.10
400 Hz	3.64	3.64	3.63	3.32
500 Hz	3.66	3.45	3.21	2.81 [pH]
630 Hz	3.48	3.48	3.34	3.00
800 Hz	3.36	3.29	3.12	2.87 [pH]
1 kHz	3.38	3.24	3.14	2.83
1.25 kHz	3.22	3.19	3.14	3.00
1.6 kHz	3.20	3.11	3.00	2.82
2 kHz	2.88	2.89	2.88	2.75
2.5 kHz	2.83	2.83	2.79	2.76
3.15 kHz	2.63	2.63	2.63	2.47
4 kHz	2.16	2.20	2.21	2.20
5 kHz	1.97	1.99	1.89	1.99

Abbildung 39: Numerische Tabelle der Nachhallzeitmessung vom 08.09.16



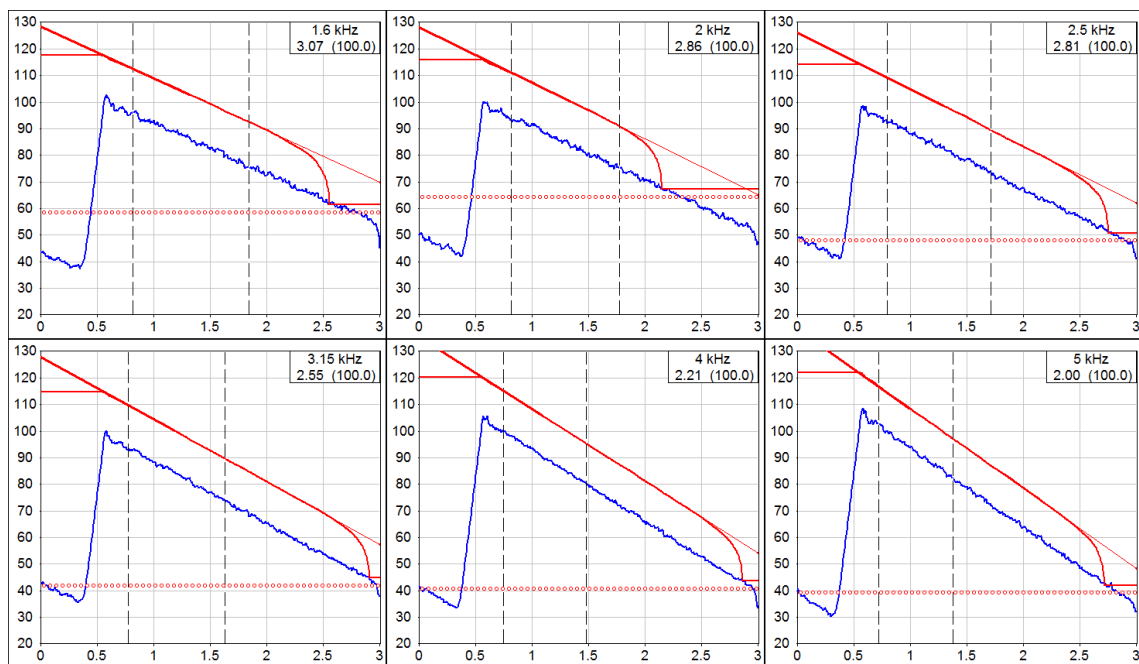


Abbildung 40: Graph der Abklingkurve der Nachhallzeitmessung vom 08.09.16

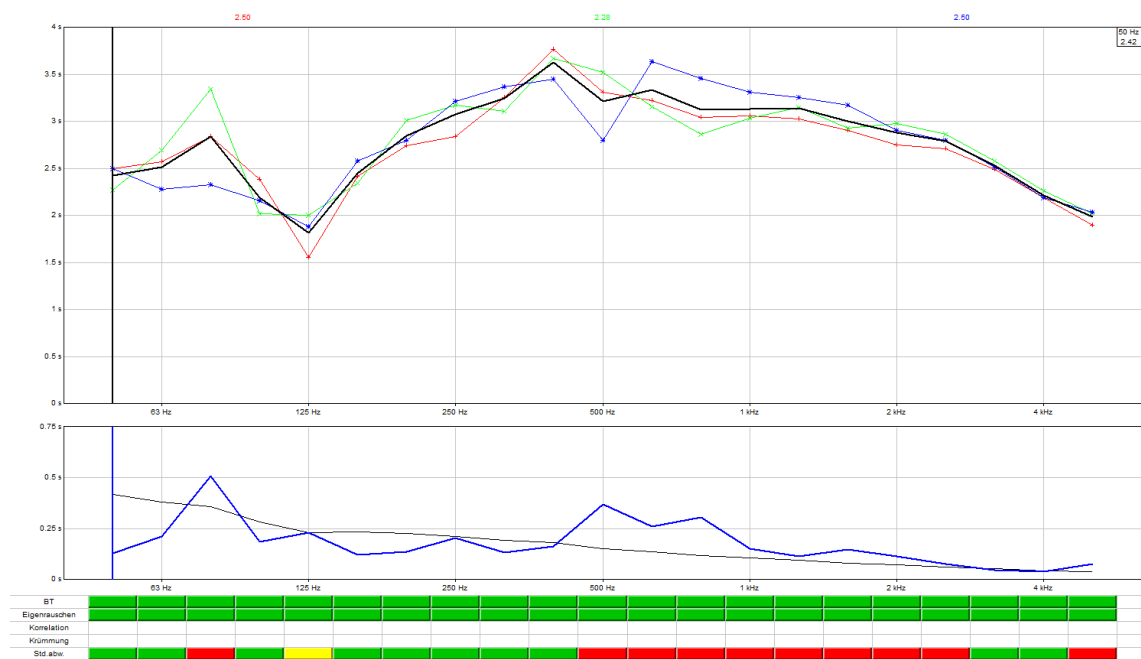


Abbildung 41: Spektrumgraph der vier Messpositionen der Messung vom 08.09.16

Anlagen, Teil 3: Dokumentation der Simulation

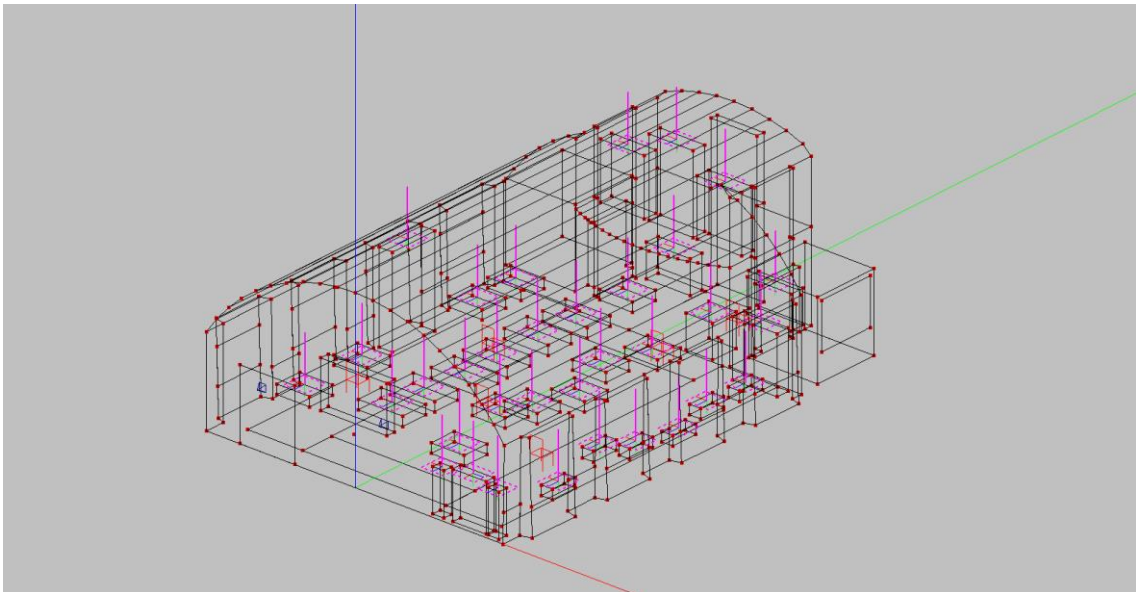


Abbildung 42: Simulationsmodell mit Instrumenten

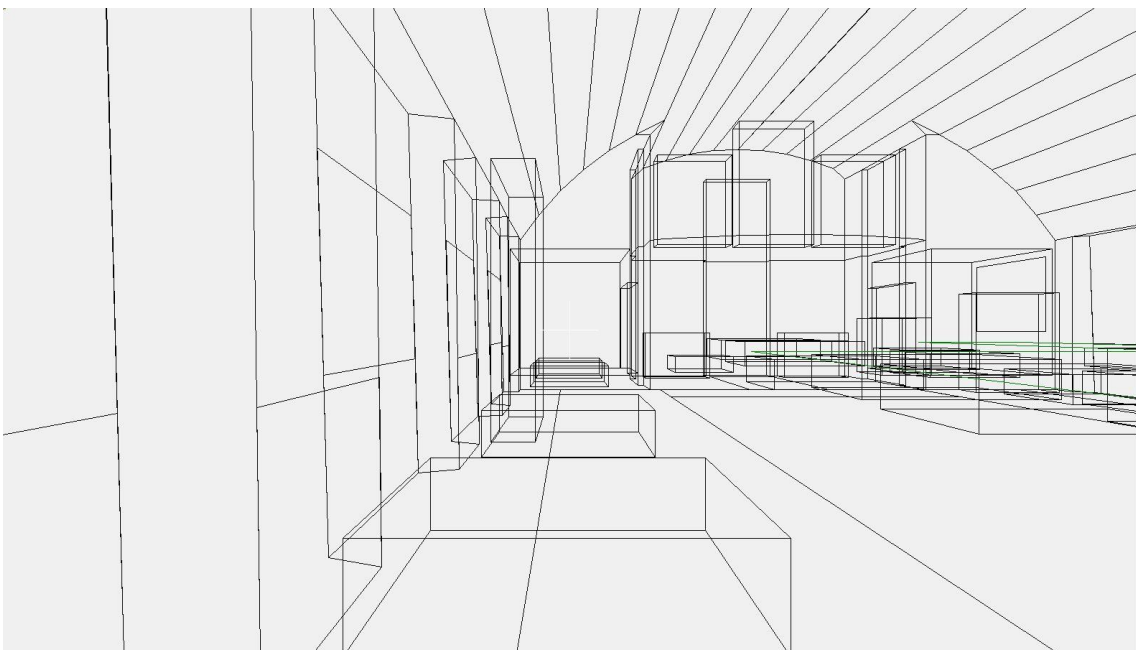


Abbildung 43: Perspektive in den simulierten Raum

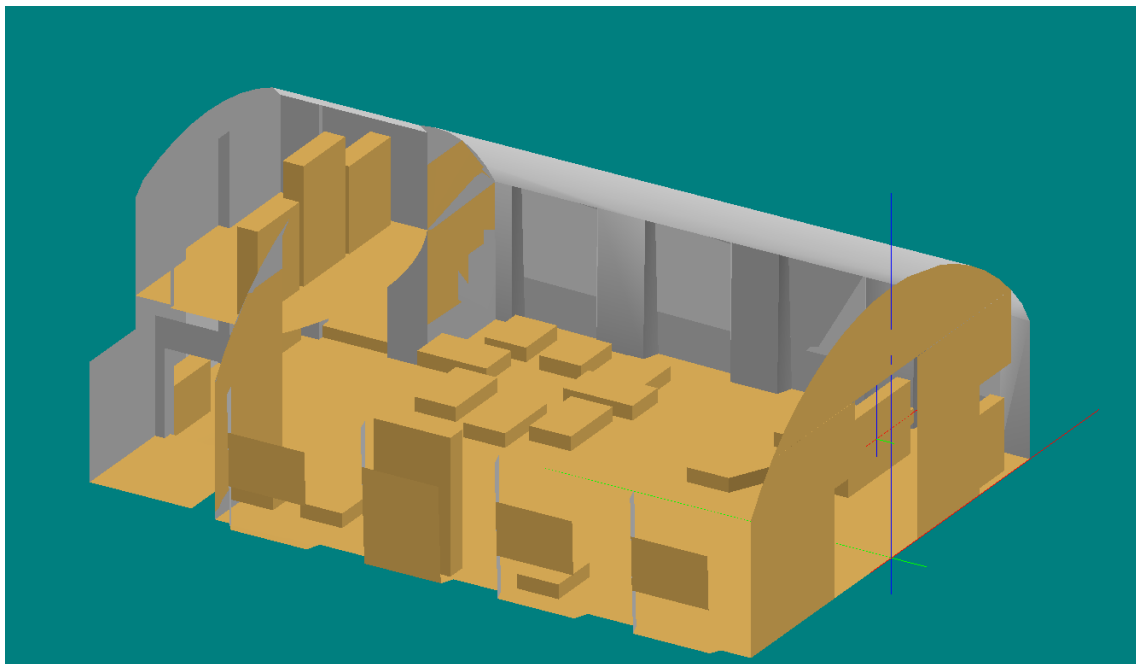
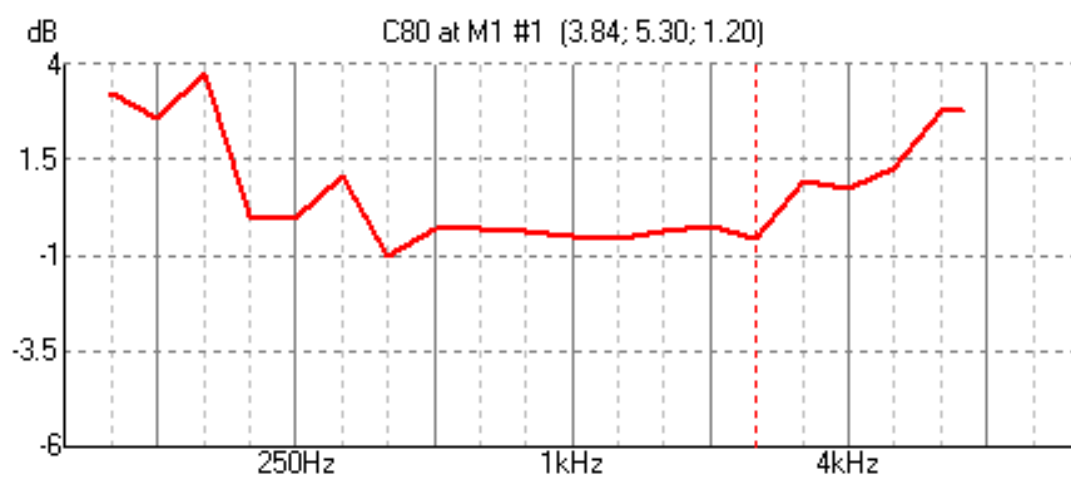
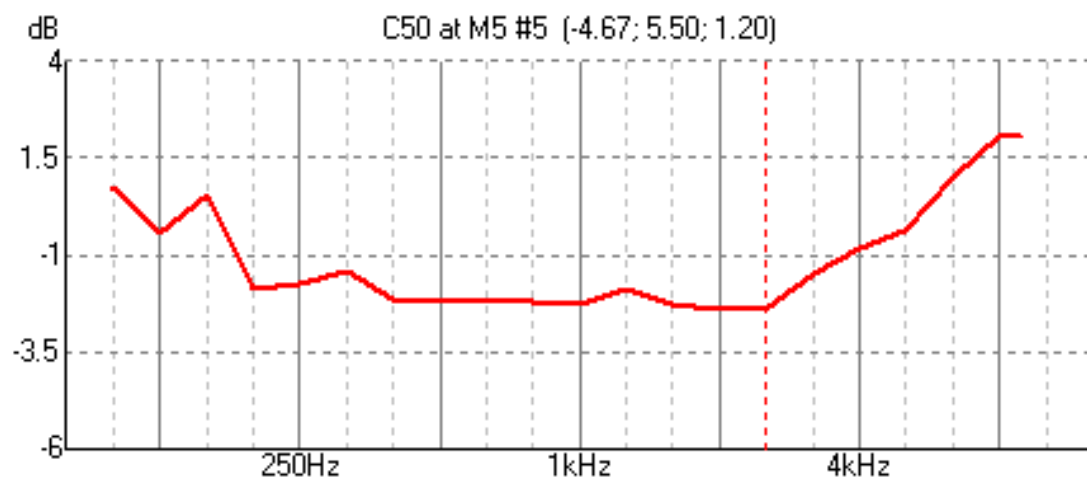


Abbildung 44: Modell der Neugestaltung der Ausstellung



(c) EASE 4.4 / DEMUS Musiksaal / 10.01.2018 09:00:39 / Möhler + Partner Ingenieure AG Kle

Abbildung 45: C80 Bewertung bei M1 aus der ersten Simulation



(c) EASE 4.4 / DEMUS Musiksaal / 10.01.2018 09:02:58 / Möhler + Partner Ingenieure AG Kle

Abbildung 46: C50 Bewertung bei M1 aus der ersten Simulation

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Till Kleinert